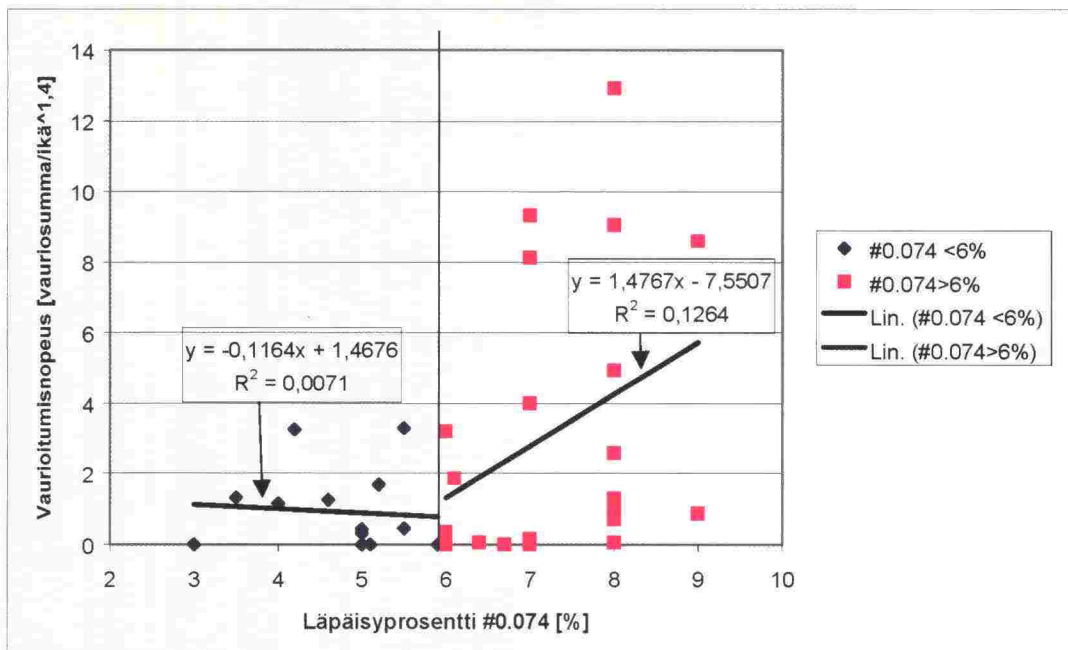


Vesa Kallio

Sitomattoman kantavan kerroksen murskeen laadun vaikutus tien vaurioitumiseen

Tiehallinnon selvityksiä 62/2003



Vesa Kallio

Sitomattoman kantavan kerroksen murskeen laadun vaikutus tien vaurioitumiseen

Tiehallinnon selvityksiä 62/2003

Kannen kuva:

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-197-5
TIEH 3200853

Verkkojulkaisu pdf (www.tiehallinto.fi/julkaisut)
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-198-3
TIEH 3200853-v

Edita Prima Oy
Helsinki 2004

Julkaisua myy/saatavana:
asiakaspalvelu.prima@edita.fi
Faksi 020 450 2470
Pyhelin 020 450 011



TIEHALLINTO
Tekniset palvelut
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 22 150

Kallio, Vesa: Sitomattoman kantavan kerroksen murskeen laadun vaikutus tien vaurioitumiseen. Helsinki 2004. Tekniset palvelut, Tiehallinnon selvityksiä 62/2003, 45 s. + liitt. 6 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-197-5, TIEH 3200853.

Asiasanat: Murskeet, kantava kerros, vaurioituminen
Aiheluokka: 39

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sitomattoman kantavan kerroksen laadun vaikutusta tien kestoikään ja tätä varten valittiin koetiejoukko.

Tutkimusta varten valittiin 25 koetietä, joilta valittiin 59 tutkimuspistettä. Koetiet valittiin siten, että ainakin 10 niistä oli pahasti vaurioituneita alle 10 vuoden ikäisiä teitä ja saman verran teistä oli hyväkuntoisia noin 8 vuoden ikäisiä teitä. Koetiejoukko valittiin eri puolilta Suomea siten, että kantavan kerroksen materiaalina oli käytetty sekä soramursketta että kalliomursketta. Roudan vaurioittamia teitä ei otettu tutkimukseen mukaan lainkaan. Tutkimusteiden kulutuskerroksen iät ja teiden vauriosummat saatiin valintaa varten kuntotietorekisteristä ja valinnan jälkeen vauriot inventoitiin uudestaan maastossa. Koeteillä tehtiin keväällä ja kesällä kantavuusmittauksia pudotuspainolaitteella ja määritettiin kantavan kerroksen tiiveys ja vesipitoisuus.

Tutkimuksessa havaittiin, että kalliomurskeesta rakennetun sitomattoman kantavan kerroksen hienoainespitoisuus vaikuttaa tien kestoikään, mutta soramurskeen hienoainespitoisuudella ei havaittu olevan vastaavaa vaikutusta tien kestoikään. Edellä mainitun tutkimustuloksen perusteella kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden (0.074 tai 0.0063 mm) tutkiminen on käytännöllisin tapa arvioida kantavan kerroksen murskeen laatua. Tulosten perusteella kalliomurskeen hienoainespitoisuus ei saisi ylittää 6 %. Soramurskeen hienoainespitoisuudelle ei löydetty vastaavaa selvää raja-arvoa.

Kantavuusmittauksilla saatava taipuma korreloi myös hyvin tien kestoiän kanssa. Ennako-odotusten mukaisesti taipuma korreloi erityisen hyvin verkkohalkeilun vaurioitumisnopeuden kanssa.

Laboratoriossa tehtiin paljon erilaisia kokeita, jotta löydettäisiin hyvä korrelaation jollekin sitomattoman kantavan kerroksen materiaalille saadun laboratoriotutkimustuloksen ja tien kestoiän välille. Esimerkiksi kiillepitoisuus, ominaispinta-ala, imupainekoe, metyleenisinitesti ja hiekkaekvivalenttiarvo eivät korreloineet koeteiden kestoiän kanssa.

Kallio, Vesa: The effect of unbound base course on the durability of roads. Helsinki 2003. Finnish Road Administration. 45 p. + app. 6 p. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-197-5, TIEH 3200853.

Key words : Crushed stone, base course, durability

ABSTRACT

A separate sample of roads was chosen for the study concerning the effect of unbound base course on the durability of roads.

The sample consisted of 59 locations on 25 roads. At least 10 of the roads had to be severely damaged when the wearing course was not older than 10 years, and at least 10 roads had to be in good condition when the age of the wearing course was c. 8 years old. The sample had to include roads where the base course consisted of both crushed rock and crushed gravel from different parts of Finland. Locations with damage caused by frost heave were not accepted. The age of the wearing coarse and the amount and type of cracking were taken from the data base and afterwards checked on the place as well. Falling weight deflometer measurements were made and moisture content and density of base course were measured on the site in spring and in summer. Unbound base coarse material samples were taken for the laboratory tests.

It was found that high fines content of crushed rock base coarse has a clear effect on durability but in crushed gravel the fines content has almost no effect on durability. According to results the most practical way to evaluate the quality of this kind of base course material is the fines content (0.074 or 0.063 mm). The fines content of crushed rock base coarse should not exceed 6 %. The fines content of crushed gravel base course has no clear limit value.

It was also found that the deflection correlated with durability . Deflection correlated very well with alligator cracking as assumed beforehand.

Very many special laboratory tests were done to find correlation between durability and laboratory test values of crushed base course material. For example mica content, specific surface area, suction test values, methylene blue value, sand equivalent value were measured but a good correlation with durability of test roads was not found.

ALKUSANAT

Tämän tutkimuksen ovat tehneet DI Vesa Kallio, geologi Teuvo Kasari ja tekn.tri Pekka Vallius. Tutkimusraportin kirjoitti DI Vesa Kallio. Tilaajana on Tiehallinnon Tekniset palvelut, jossa tilaajan edustajana työhön ovat osallistuneet DI Kari Lehtonen ja DI Tuomo Kallionpää. Tuloksia käytetään laatuvaatimusten kehittämisessä.

Tutkimuksen esitutkimusvaiheessa tilattiin alikonsultteina toimineilta geologi Timo Saarenkedolta (Roadscanners Oy) ja tekn.lis. Jouko Beltiltä (Oulun yliopisto) kirjallisuusselvitykset tutkimusaiheesta. Timo Saarenkedon kirjallisuusselvitys oli nimeltään "Sitomattoman kantavan kerroksen mekanistis-termodynaamiset ominaisuudet ja niiden sähköiset tutkimusmenetelmät" /9/. Jouko Beltin kirjallisuusselvitys oli nimeltään "Sitomattoman kantavan kerroksen vaikutus päällysteen kestävyYTEEN" /1/. Molemmat esiselvitykset ovat julkaisemattomia.

Tielaitoksen konsultoinnin henkilökunta teki tutkimukseen liittyvät kenttätutkimukset rkm. Reijo Jokelan johdolla. Laboratoriotutkimuksia tehtiin tielaitoksen laboratorioissa ja Vaasan yliopiston laboratoriossa.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	TUTKIMUSOHJELMA	10
2.1	Tutkimuksen tavoitteet	10
2.2	Tutkimuksen osavaiheet	11
2.3	Kenttätutkimusohjelma	11
2.4	Laboartoriotutkimukset	13
3	TUTKIMUSTULOKSET	14
3.1	Kantavan kerroksen laadun indikaattorit	14
3.2	Tutkimusaineisto	15
3.3	Sora- ja kalliomurskeiden vertailu	16
3.4	Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden vaikutus tien vaurioitumiseen	17
3.4.1	Tutkimushetken hienoainespitoisuus	17
3.4.2	Murskaus- ja rakennusaikainen hienoainespitoisuus	18
3.4.3	Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden vaikutus tien vaurioitumiseen	19
3.5	Pudotuspainolaitteella mitatun taipuman yhteys tien vaurioitumisnopeuteen	22
3.6	Päällystepaksuuden ja päällystetyypin yhteys tien vaurioitumisnopeuteen	28
3.7	Muut laboratoriotutkimusmenetelmät	29
3.7.1	Hienoainespitoisuus #0.02	29
3.7.2	Metyleenisinitesti ja hiekkaekvivalenttisarvo	31
3.7.3	Geoarvio, mineraalikoko ja kiillepitoisuus	32
3.7.4	Kiviaineksen ominaispinta-ala ja veden adsorptio	35
3.7.5	Imupainekoe (Tube Suction)	37
3.7.6	Kiertotiivistyskoe (IC-koe)	38
3.7.7	Troxler-tiiviys ja vesipitoisuus	39
3.8	Eräiden muuttujien välisiä yhteyksiä	40
3.8.1	Metyleenisiniarvon ja veden adsorption välinen yhteys	40
3.8.2	Hiekkaekvivalenttisarvon ja hienoainespitoisuuden # 0.074 välinen yhteys	41
3.8.3	Hienoainespitoisuuden ja kantavuusmittauksista takaisinlasketun kerrosmoduulin välinen yhteys	42
4.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	43
5.	KIRJALLISUUSLUETTELO	44
6.	LIITTEET	45

1 JOHDANTO

Tierakenteiden mitoittaminen ja materiaaliominaisuuksien tutkimusmenetelmät ovat kehittyneet merkittävästi viime vuosina ja tienrakentamisen kaikkien työvaiheiden laadunvalvonta on ohjeistettu. Tästä huolimatta joudutaan yhä vielä tekemään ennenaikaisia sitomattoman kantavan kerroksen kuormituskestävyyden peittämisestä rakenteenparantamistöitä huomattavasti ennen tielle suunnitellun mitoitusajan täyttymistä. Mistä tämä johtuu?

Ovatko nykyiset kantavalle kerrokselle asetetut laatuvaatimukset perusteltuja?

Tutkitaanko oikeita murskeen ominaisuuksia ja onko mitoitusmenettely perusteltu esim. mitoituksessa käytettävien moduulien osalta?

Mitkä ovat ne sitomattoman kantavan kerroksen laatuominaisuudet, joiden vaihtelun perusteella samanlaisissa olosuhteissa toinen tie kestää vuosikymmenien ajan ja toinen vaurioituu muutamassa vuodessa?

Edellä mainittujen asioiden tärkeys tulee vielä korostumaan Tiehallinnon teettämien töiden avautuessa asteittain avoimeen kilpailuun. Joudutaan entistä tarkemmin määrittelemään hyväksyttävä laatutaso ja laadun alituksesta johtuvat arvonmuutosperusteet. Lisäksi tienrakentamiseen käytettävissä olevat kiviainekset vähenevät.

2 TUTKIMUSOHJELMA

2.1 Tutkimuksen tavoitteet

Projektisuunnitelmavaiheessa tutkimuksen tavoitteet määriteltiin seuraavasti:

1. Nykyisten laatuvaatimusten kelpoisuuden selvittäminen

- Selvitetään, missä määrin nykyiset kantavan kerroksen laatuvaatimukset ovat perusteltuja ja vastaavat käytännön tarpeita.
- Laaditaan esitys nykyisten laatuvaatimusten korjaustarpeista ja esitetään mahdollisten uusien tutkimusmenetelmien ottamista koekäyttöön.
 - Selvitetään, miten murskeen laatu osoitetaan erityyppisissä tiehankkeissa ja tehdään tutkimusaineiston puitteissa havaintoja kiviaineksen mineralogian vaikutuksesta murskeen kuormituskestävyyteen.

2. Tutkimusmenetelmien vertailu

- Tutkitaan, millä havaintotieaineiston kantavan kerroksen laatuominaisuuksilla löytyy paras korrelaatio tien pinnan vaurioitumisen suhteen (ei koske pohjamaan routimisen eikä painumisen aiheuttamia vaurioita).
- Tutkitaan maatumien kelpoisuutta kantavan kerroksen murskeiden laatuominaisuuksien tunnistamisessa.
- Vertaillaan hienoaineksen tutkimusmenetelmiä.
- Arvioidaan EN-standardiluonnoksen vaikutuksia ja raportoidaan tämän tutkimuksen perusteella havaitut standardin korjaustarpeet.

3. Analyttisen mitoituksen kehittäminen

- Tutkitaan löytyykö menetelmä määrittää sitomattomien materiaalien moduuli standardimateriaalien moduuleista korjauskertoimien avulla, jotka saataisiin käyttämällä rakeisuustietojen ohella hyväksi muita yksinkertaisia laboratoriokokeita.
- Tutkitaan onko laboratoriossa määritetyllä dynaamisella moduulilla ja pudotuspainolaitteen kantavuusmittaustuloksista takaisinlaskennalla saatulla kesämoduulilla korrelaatio tutkittavalla havaintoaineistolla.
- Tutkitaan vedenherkkyyden korrelaatio dynaamisen moduulin kanssa, jolloin pudotuspainolaitteen kesäkantavuusmittaukset voitaisiin tarvittaessa muuntaa kevämoduuleiksi.

4. Esitys laatuvaatimuksista ja arvonmuutosperusteista sitomattomalle kantavalle kerrokselle

2.2 Tutkimuksen osavaiheet

Tutkimus jakaantui seuraaviin osavaiheisiin:

- Alustava tutkimussuunnitelma
- Esitutkimusvaihe
- Tutkimussuunnitelman tarkistaminen
- Yksityiskohtaisen kenttätutkimusohjelman suorittaminen
- Yksityiskohtaisen laboratoriotutkimusohjelman suorittaminen
- Tulosten analysointi
- Johtopäätökset ja raportointi

Alustava tutkimussuunnitelma tehtiin keväällä 1998.

Tutkimusohjelman esitutkimusvaiheessa on käyty läpi olemassaoleva tutkimustieto Jouko Beltin /1/ ja Timo Saarenkedon/2/ erillisissä raporteissa. Näiden raporttien ja projektiryhmässä käytyjen keskustelujen pohjalta valmisteltiin yksityiskohtainen kenttätutkimus- ja laboratorio-ohjelma. Kenttätutkimusohjelma suoritettiin pääosin vuonna 1998. Myöhemmin tutkimusohjelmaan päätettiin lisätä vaurioinventoinnit ja tasaisuusmittaukset, jotka tehtiin kevätkesällä 1999.

Tutkimusohjelman päivitys tehtiin keväällä 1999. Tutkimustulosten analysointi aloitettiin vuonna 1999. Johtopäätökset tutkimustuloksista ja tutkimustulosten raportointi tehtiin pääosin vuonna 2000. Lopullinen tutkimusraportti kirjoitettiin vuonna 2002.

2.3 Kenttätutkimusohjelma

Kenttätutkimusohjelmaan valittiin 25 tiekohdetta Oulun, Vaasan ja Kaakkois-Suomen tiepiireistä. Tiekohteiden valintaperusteina pidettiin seuraavia kriteereitä:

- Tien on oltava rakennettu: suodatin, jakava, kantava, yksi päällyste (Ös, KAB, PAB).
- Tutkimuskohteet valittu siten, että niissä ei ole routavaurioita.
- Vaurioituneissa kohdissa päällyste ohjeellisesti 3 – 10 vuotta vanha ja ehjissä 7-10 vuotta vanha.
- Ei päällystekerroksia sitomattomien kerrosten alla.
- Ei erikoismateriaaleja (kuonat, palaturve, tuhkat jne.).
- Kantava kerros on joko soramurskeesta tai kalliomurskeesta.
- Teistä >10 kpl nopeasti vaurioituneita ja >10 kpl hitaasti vaurioituneita.
- Vältetään teitä, joiden kuljetuksista suurin osa on raaka-ainekuljetuksia.
- Suositaan teitä, joilla on sekä hitaasti että nopeasti vaurioituneita jaksoja samalla tiellä, mutta raskaan liikenteen määrä on vakio eri jaksoilla.
- Ohjeellinen liikennemäärä nopeasti vaurioituneella tiellä 300 – 600 ajoneuvoa/vrk ja hitaasti vaurioituneella 600 – 900 ajoneuvoa/vrk.

Jokaiselta tiekohteelta valittiin 2 - 3 näytteenottokohtaa. Näytteenottokohtia on yhteensä 59 kpl 25 tiellä. Näytteenottokohtien tierekisteriosoitteet on esitetty liitteessä 1.

Konsultoinnin paikalliset geopalvelu- ja tiestötietoyksiköt tekivät kenttätutkimukset pääosin vuonna 1998. Jokaisella näytteenottokohdalla tehtiin seuraavat toimenpiteet:

- Näytteenottokohdan keskipisteen kohta merkittiin keltaisella maaliviivalla näytteenottokohdan viereen ja lisäksi maalattiin tiehen pisteen tunnus.
- Näytteenottopaikka valokuvattiin: kuva tien pinnasta, aukaistu tie ja näkyvät molempiin suuntiin teitä.
- Ennen päällysteen poistamista näytteenottokohdalla tehtiin kantavuusmittaukset keskipisteen kohdalla sekä 1 metrin päässä keskipisteestä tien molempiin suuntiin. Lisäksi tehtiin 4 kantavuusmittausta 2 metrin välein tien molempiin suuntiin, yhteensä siis 11 mittausta/näytekohta.
- Maatutkalla tutkittiin koekuopan ympäristö ja välit noin 3 km:n matkalla/tiekohde kohteella.
- Tien rakennekerrosten paksuudet, jakavan kerroksen laatu ja pohjamaan maalaji selvitettiin näytekairauksilla.
- Kantavan kerroksen näytteenottoa varten tiestä poistettiin päällyste (timanttisaha tai vastaava) noin 0,5 x 1,0 metrin suuruiselta alueelta siten, että kantavaa kerrosta häirittiin mahdollisimman vähän.
- Mitattiin kantavan kerroksen tiiviys Troxlerilla 3 kohdasta.
- Mitattiin Er-arvot Er-sondilla 3 kohdasta.
- Otettiin 15 kg näytettä kantavan kerroksen pinnasta 0 ... 5 cm ja 15 kg näytettä koko kantavasta kerroksesta 0 ... 20 cm rakeisuustutkimuksia ja hienoainestutkimuksia varten ja erilliset vesipitoisuusnäytteet molemmista.
- Otettiin vähintään 150 kg näytettä, joka edusti koko kantavaa kerrosta.
- Näytteenottopaikka täytettiin mukana tuodulla murskeella kerroksittain tiivistäen ja tien pinta paikattiin öljysoralla tai vastaavalla.
- Näytteet toimitettiin tutkittavaksi/säilytettäväksi paikallisen konsultointiyksikön laboratorioon.

Keväällä- 99 tehtiin seuraavat mittaukset kohteilla:

- Maatutkalla tutkattiin 5 aikaisemmin tutkittua kohdetta uudestaan.
- Pudotuspainolaitemittaus samoissa pisteissä kuin näytteenoton yhteydessä, mutta ei näytteenottokohdasta, koska rakeisuus muuttunut. Ensimmäinen mittaus tehtiin kantavan kerroksen ollessa sula ja pohjamaan ollessa vielä jäässä ja toinen mittaus roudan sulamisen jälkeen.

Kenttätutkimukset aloitettiin Vaasan tiepiirin tiestöllä Reijo Jokelan johdolla. Sieltä saatuja kokemuksia hyödynnettiin muualla tehtävissä kenttätutkimuksissa. Reijo Jokela oli mukana muiden tiepiirien alueella tehdyissä tutkimuksissa ensimmäisessä koekohteessa varmistamassa, että kaikki kenttätutkimukset tehtiin samalla tavalla.

2.4 Laboratoriotutkimukset

Laboratoriokoeohjelmaa suunniteltaessa oletettiin, että kiviainesten lujuuskoe-
tulokset ja geologiset lausunnot löytyvät työmaan laboratorioarkistoista. Suurin
osa laboratoriotutkimuksista tehtiin tielaitoksen konsultoinnin omissa laborato-
rioissa Helsingissä, Oulussa, Kouvolassa, Jyväskylässä ja Rovaniemellä. Osa
näytetutkimuksista tehtiin Vaasan yliopistossa. Laboratoriotutkimuksia on tehty
seuraavasti:

- Rakeisuusmääritykset kantavan kerroksen yläosasta ja koko kantavasta kerroksesta, 2 x 59 näytettä, yhteensä 118 rakeisuusmääritystä.
- Vesipitoisuuden määrittäminen koko kantavasta kerroksesta, 59 vesipitoisuusmääritystä.
- IC-koe 3 vesipitoisuudessa yksi sarja/tiekohde 3 x 26 koetta, yhteensä 78 koetta.
- Ominaispinta-alan määrittäminen 1/näytteenottopiste, 56koetta.
- Veden adsorptiokoe 1/näytteenottopiste, 53 koetta.
- Metyleenisinikokeet, 10 koetta.
- Hiekkaekvivalentin määrittäminen, 10 koetta.
- Imupainekokeet, 2/tiekohde, yhteensä 47 koetta.
- Kiviaineksen lujuuskokeiden täydennykset, 5 kuulamylykoetta.
- Kiviaineksen geoarviointi, 26 arviointia.

Yhteensä laboratoriossa tehtiin 432 erilaista määritystä.

3 TUTKIMUSTULOKSET

3.1 Kantavan kerroksen laadun indikaattorit

Sitomattoman kantavan murskekerroksen laatu vaikuttaa moniin tieltä mitattaviin kuntoarvoihin. Se vaikuttaa ainakin seuraaviin kuntomuuttujiin:

- tien kantavuus ja tien taipumasuppilo
- kantavan kerroksen takaisinlaskettu moduuli
- tien urautuminen ja deformatuminen
- tien vauriosumma
- tien vaurioitumisnopeus
- routanousu

Tienpitäjän kannalta tien vaurioitumisnopeus on tärkein kuntomuuttuja. Päällysteiden vaurioitumisnopeuteen vaikuttavat kantavan kerroksen murskeen lisäksi esim. päällysteen tyyppi, tien rakennevahvuus, pohjamaan laatu ja raskaan liikenteen määrä. Pelkän päällysteiden vauriosumman käyttäminen vaurioitumisnopeuden sijasta ei ole järkevää, koska päällysteen ikä vaikuttaa luonnollisesti myös vauriosumman suuruuteen. Vaurioitumisnopeutta käyttämällä voidaan siten käyttää havaintoaineistona eri-ikäisiä teitä.

Tien vaurioitumisnopeus määritellään tässä seuraavasti:

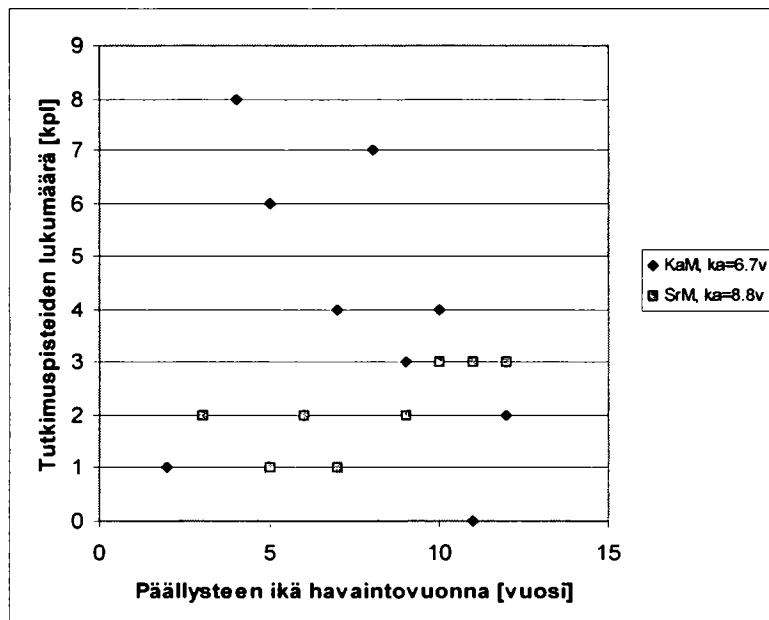
Tien vaurioitumisnopeus = tien vauriosumma/päällysteen ikä^a, jossa a = ns. ikäeksponentti

Kirjallisuudessa ikäeksponentti saa yleensä arvoja väliltä 1...2. PMS-järjestelmässä ikäeksponenttina on käytetty lyhyen aikavälin ennusteissa arvoa 1,0, mutta kuntotietorekisterin aineistoa (joista vähintään 2 mittausa) /4/ analysoimalla ko. eksponentiksi on saatu 2. Ikäeksponentin 2 käyttäminen saattaa laskennallisesti johtaa suurella iällä ylisuureen vauriosummaan. Tämän takia ikäeksponentin perusarvona on tässä tutkimuksessa käytetty 1.4, mutta rinnalla on käytetty myös ikäeksponentin arvoja 1.0 ja 2.0.

Suomessa kantavan kerroksen laatu korostuu, koska meillä käytetään suurimpia sallittuja akselipainoja ja hyvin ohuita päällysteitä esim. Keski-Euroopan maihin verrattuna.

3.2 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineistosta on poistettu kuvaa 14 lukuun ottamatta aineistoon kuuluvat muutamat AB- tiet, jotta ne eivät vääristäisi tutkimustuloksia suurimman osan tutkimusaineiston teistä ollessa öljysorapäälysteisiä. Kuvassa 1 on esitetty tutkimusteiden päälysteiden ikä havaintovuonna.



Kuva 1. Tutkimusteiden päälysteiden ikäjakauma.

Otosteiden kantavat kerrokset olivat sitomattomia kallio- tai soramurskeiteitä. Tutkimuksen soramursketiet olivat kalliomursketeitä keskimäärin 2 vuotta vanhempia (keskiarvot noin 9 ja 7 vuotta).

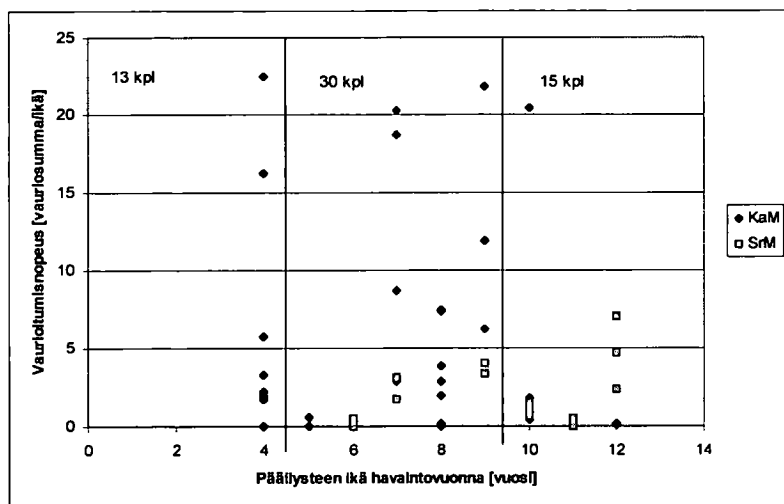
Otostiet pyrittiin valitsemaan siten, että niissä esiintyisi lähinnä kuormituskestävyyspuutteesta johtuvaa verkkohalkeilua, reikiintymistä ja urautumista ja että selvien routahalkeamien osuus vauriosummassa ei olisi merkittävä.

Tien tasaisuutta, IRI:n tai urien kasvunopeutta ei ole mitattu. Vaurioitumisnopeuden arviointi perustuu koekohteissa tehtyihin vaurioinventointeihin, joista vaurioitumisnopeus on laskettu päälysteen iän perusteella. Vaurioinventoinnin teki konsultoinnin tiestötietomittausryhmä, eli sama ryhmä joka tekee vuosittaiset kuntotietorekisterin päivitykseen liittyvät vaurioinventoinnit. Vaurioitumisnopeuden laskennassa huomioitiin kaikki tiellä olevat vauriosummaa aiheuttavat vauriot.

3.3 Sora- ja kalliomurskeiden vertailu

Ennakkokäsitys oli, että sora- ja kalliomurskeet saattaisivat käyttäytyä eri tavalla murskeiden erilaisista raaka-aineista johtuen. Kalliomurskeet joutuvat ilmasto-
rasitukselle alttiiksi vasta louhinnan jälkeen. Soramurskeiden raaka-aineen
jääkausi on "esimurskannut" ja soraesiintymät ovat olleet myöhemmin kiinteää
kalliota enemmän veden ja ilman kanssa kosketuksissa.

Ikä vaikuttaa otosteiden vauriosummaan. Kuvassa 2 otosteiden vauriosumma
on muutettu vaurioitumisnopeudeksi, jolloin eri ikäisten teiden vaurioituminen
saadaan yhteismitalliseksi.



Kuva 2. Eri ikäisten otosteiden vaurioitumisnopeus (ikäeksponentti 1.0).

Otosteiden valinta pyrittiin tekemään siten, että aineisto sisältäisi sekä
nopeasti vaurioituvia uusia päällysteitä että hitaasti vaurioituvia vanhoja
päällysteitä, jotta karkeimmat erot vaurioitumisnopeudessa saataisiin
esiin. Tässä tavoitteessa on onnistuttu kohtuullisen hyvin. Tutkimuksen
kalliomursketeiden vaurioitumisnopeudet olivat huomattavasti soramurs-
keteiden vaurioitumisnopeuksia suurempia.

Tulokseen voi jossakin määrin vaikuttaa kohteiden valinta, koska soramursketiet
sijaitsevat pääasiassa Pohjois-Suomessa ja suurin osa kalliomursketeistä sijait-
see Vaasan seudulla, jossa hyvien kiviainesten saatavuudessa on ongelmia.
Kalliomurskeiden raaka-aineet olivat Vaasan alueella etupäässä graniittia ja
gneissiä, mutta kiviainespaiikkoja oli useita. Soramursketeiden vaurioitumis-
nopeudet jäivät pieniksi kalliomurskeiden vaurioitumisnopeuksiin verrattuina.
Yrityksistä huolimatta ei löydetty kalliomursketeiden kaltaisia nopeasti vaurioitu-
via soramursketeitä. Soramursketeiden PAB-päällysteissä on todennäköisesti
myös käytetty soramursketta, joka voi vaikuttaa päällysteiden väsymiskestävyy-
teen.

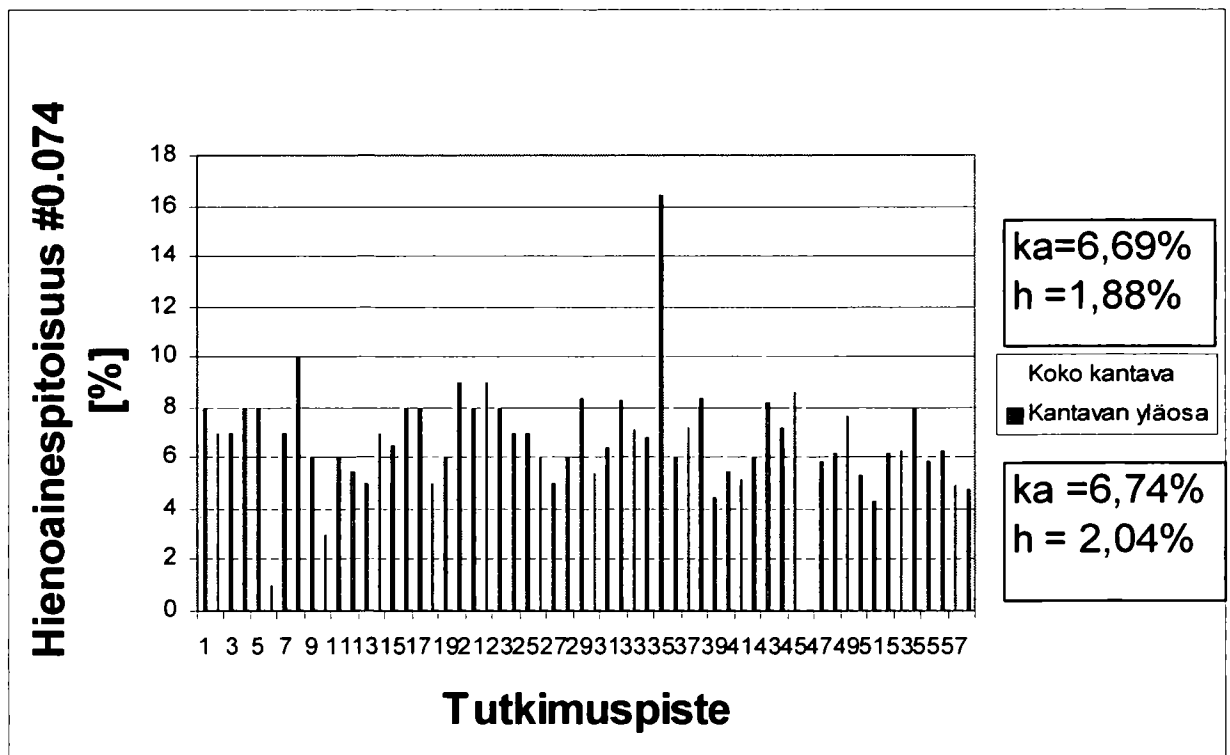
3.4 Hienoainespitoisuuden vaikutus vaurioitumiseen

Testattavat väitteet:

- Kantavan kerroksen murskeissa esiintyy huomattavia rakeisuusvaihte-
luita.
- Kantavan kerroksen suuri hienoainespitoisuus korreloi tien pinnan vaurioi-
den kanssa.
- Päällysteen alla erityisesti kantavan kerroksen pinnan hienoneminen
aiheuttaa tien vaurioitumista

3.4.1 Tutkimushetken hienoainespitoisuus

Kuvassa 3 on esitetty tutkimusteiden kantavan kerroksen hienoainespitoisuus koko kantavasta kerroksesta ja kantavan kerroksen pinnasta otetuista näyt-
teistä.

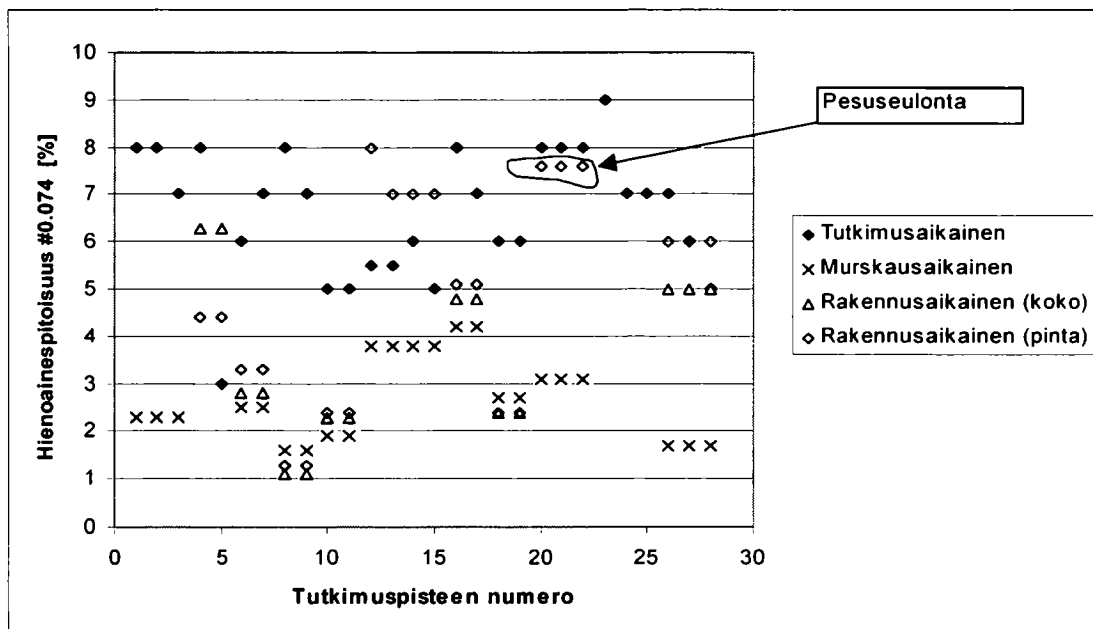


Kuva 3. Kantavan kerroksen hienoainespitoisuus (#0.074) pintanäytteestä (0-5 cm) ja koko kantavasta kerroksesta määritettynä.

Kantavan kerroksen yläosan hienoainespitoisuuden keskiarvo (6.74 %) oli ainoastaan hieman koko kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden keskiarvoa (6.69 %) suurempi, eli kantavan kerroksen pintaosan hienonemista ei ollut tutkimuskohteissa tapahtunut. Pintaosan hienoainespitoisuuden merkittävästi suurempi hajonta viittaa siihen, että yksittäisissä kohteissa on joko käytetty rakennusaikaisessa liikenteen hoidossa hienompaa mursketta tai kerroksen pinta on hienontunut tiivistämistyön seurauksena.

3.4.2 Murskaus- ja rakennusaikainen hienoainespitoisuus

Rakennusaikaisia rakeisuuskäyriä oli käytettävissä vain muutamista kohteista. Kuvassa 4 on vertailtu tutkimuksen hienoainespitoisuuksia vastaaviin rakennusaikaisiin hienoainespitoisuuksiin Vaasan tiepiirin kohteissa.



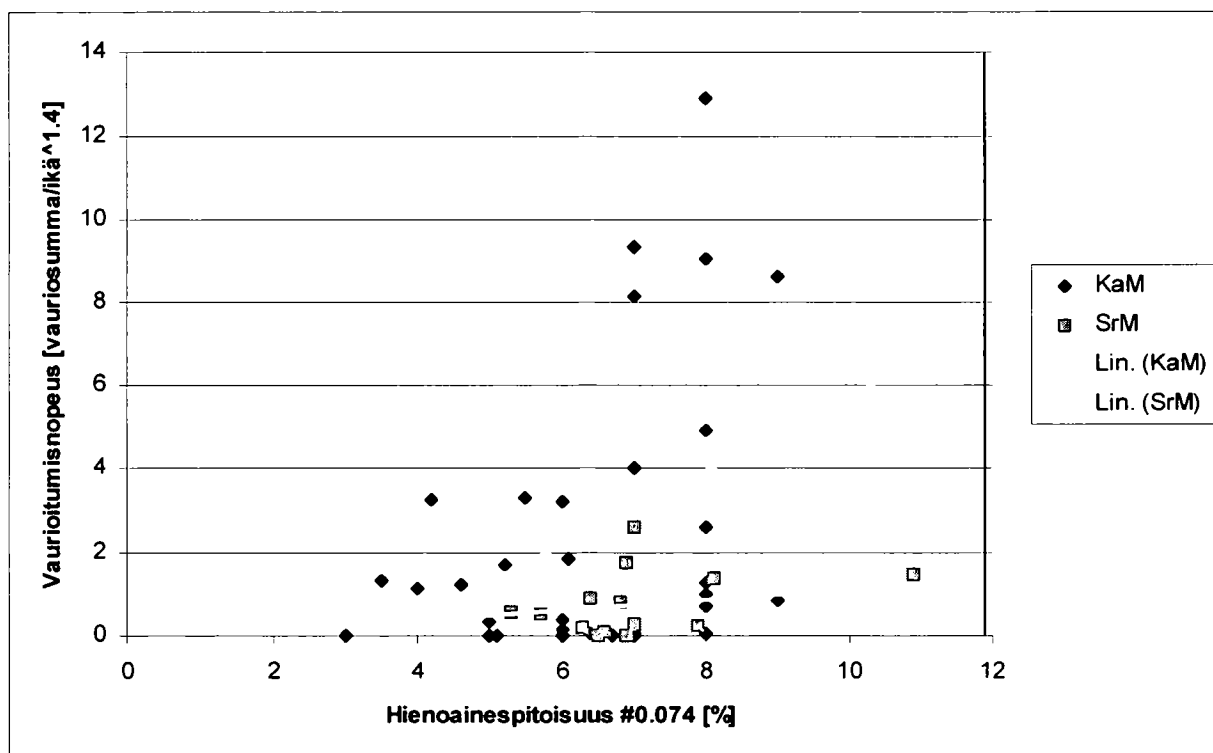
Kuva 4. Tutkimusteiden kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden vertailu murskaus- ja rakentamisaikana tehtyihin hienoainesmäärittäyksiin.

Kuvasta havaitaan, että kolmessa tutkimuspisteessä, missä sekä rakennusaikainen että tutkimusaikainen näyte on tutkittu pesuseulonnalla, rakennusaikainen ja tutkimusaikainen hienoainespitoisuus on lähes yhtä suuri. Muissa pisteissä murskausaikaiset ja rakennusaikaiset hienoainespitoisuudet on tutkittu kuivaseulonnoilla, joten ne eivät ole vertailukelpoisia tutkimuksen pesuseulonnoilla saatuihin hienoainespitoisuuksiin. Rakennusaikaina otetuissa kontrollinäytteissä hienoainespitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa kuin murskausaikana. Kuvassa esitetyt murskaus- ja rakentamisaikaiset hienoainespitoisuudet ovat keskiarvotietoja.

Murskausaikana ja rakentamisaikana on tehty pelkät kuivaseulonnat ja nyt tämän tutkimuksen yhteydessä on tehty pesuseulonta, jossa kivirakeissa kiinni oleva hienoaines tulee mukaan hienoainespitoisuuteen. Esimerkiksi 1000 g tutkimusnäytteessä 30 – 40 g hienoainesta merkitsee 3 – 4 % hienoainespitoisuudessa. Varsinkin rakennekerroksista otetuissa näytteissä kuivaseulonnan ja pesuseulonnan välinen ero hienoainespitoisuudessa saattaisi olla tätä suuruusluokkaa. Tämän suuntaisia kokemuksia tutkimusmenetelmien eroista on havaittu Tieliikelaitoksen Kempeleen maatutkimuslaboratoriossa.

3.4.3 Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden vaikutus tien vaurioitumiseen

Kuvassa 5 on tarkasteltu lähemmin kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisen välistä yhteyttä.



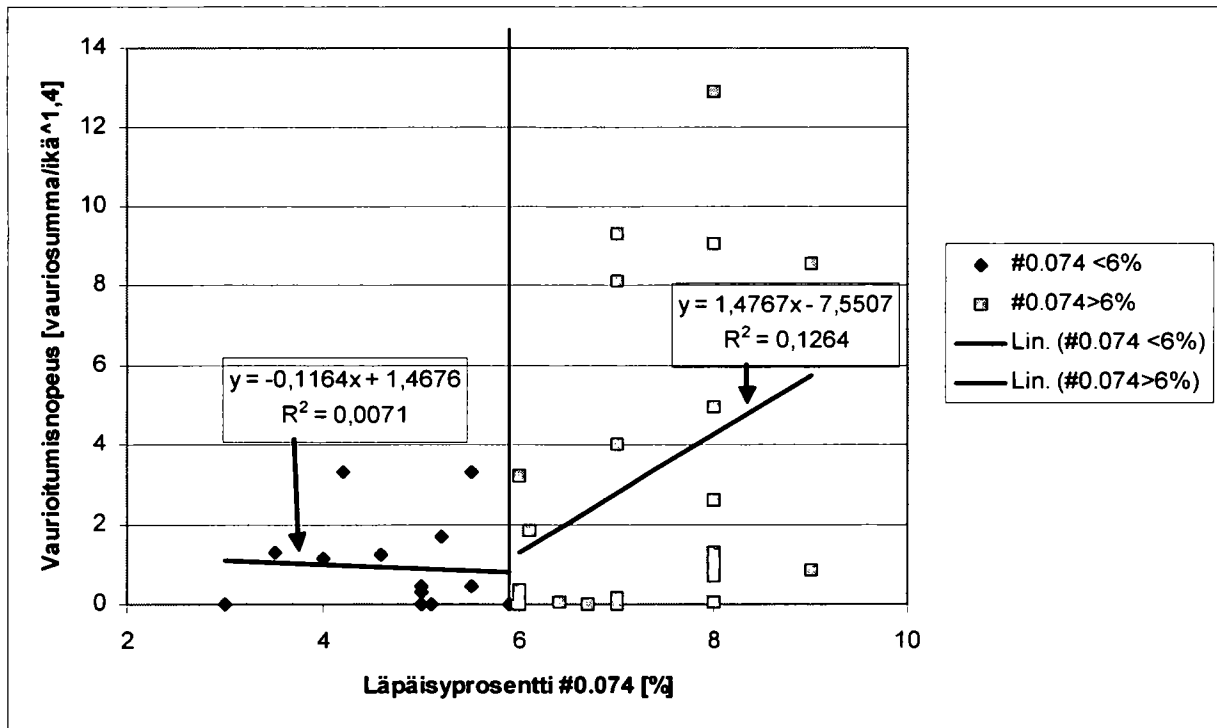
Kuva 5. Hienoainespitoisuuden #0.074 ja vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden kasvaessa tien vaurioitumisnopeus kasvaa ja kasvunopeus on kalliomurskeilla huomattavasti soramurskeita nopeampaa. Sen vuoksi kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden ja vaurioitumisnopeuden välistä yhteyttä on syytä jatkossa tarkastella erikseen kallio- ja soramurskeilla.

Kallio- ja soramurskeiden käyttäytymiseroille löytyy luonnollinen selitys. Soramurskeen raaka-aine on ollut alttiina ilmastorasitukselle ja siihen liittyville kemiallisille reaktioille eri tavalla kuin kiinteä kallio. Kiinteä kallio joutuu alttiiksi em. reaktiolle vasta louhinnan jälkeen, kun taas soramurskeessa "vanheneminen" on tapahtunut tuhansien vuosien aikana.

Kallio- ja soramurskeen käyttäytymiseroon voi jossakin määrin vaikuttaa myös koeteiden valintatapa (vrt. sivu 17). Käyttäytymisero olisi syytä todeta myös toisella aineistolla ennen lopullisten johtopäätösten tekemistä.

Kuvassa 6 on esitetty tarkemmin kantavan kerroksen kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

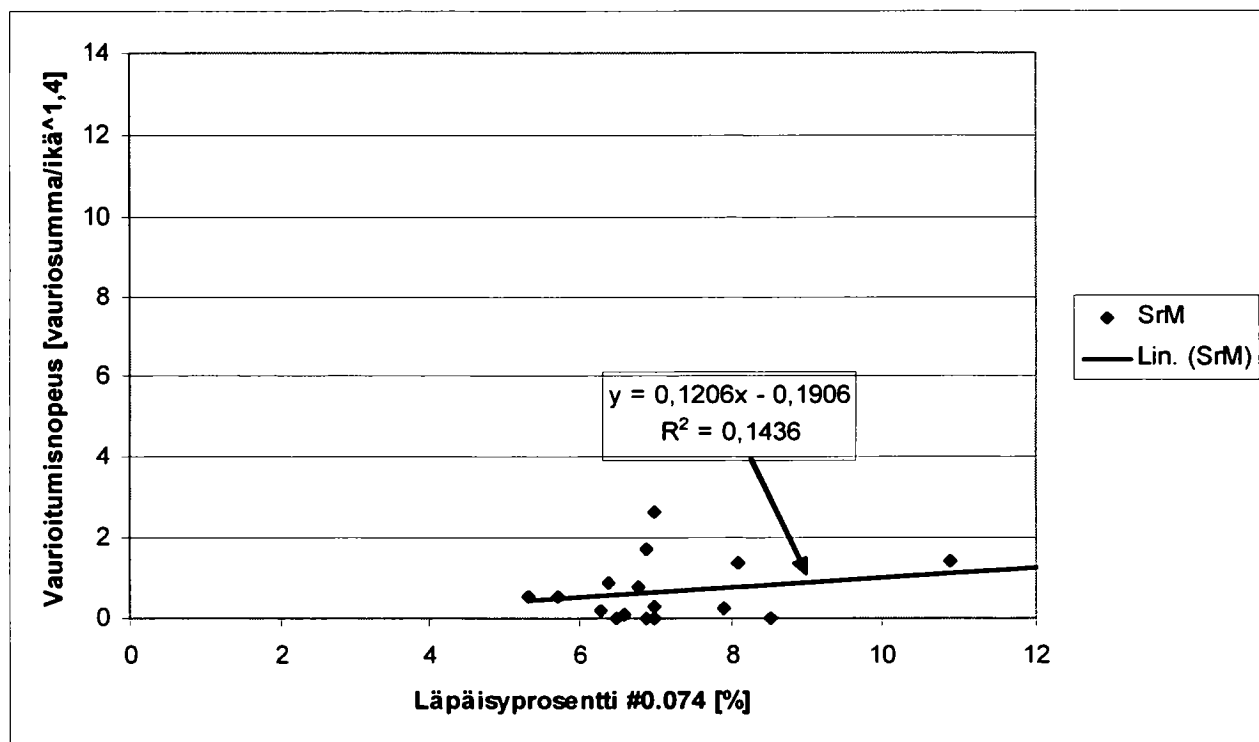


Kuva 6. Kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys (kuva, jossa ikäeksponentti 1.0 on esitetty liitteessä 2).

Alle 6 %:n hienoainespitoisuuksilla otosteiden vaurioituminen on hidasta. Kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ylittäessä 6% otosteiden vaurioitumisnopeus kasvaa voimakkaasti hienoainespitoisuuden kasvaessa. 6%:n raja-arvon sijasta voisi perustellusti käyttää myös muita arvoja väliltä 5.5 .. 6.5%, mutta tulos ei olennaisesti muutu.

Liitteessä 3 on esitetty vastaavat kuvat, kun hienoainespitoisuuden raja-arvoina on käytetty 5.4 % ja 6.3 %.

Kuvassa 7 on tarkasteltu soramurskeen hienoainespitoisuuden vaikutusta vaurioitumisnopeuteen.



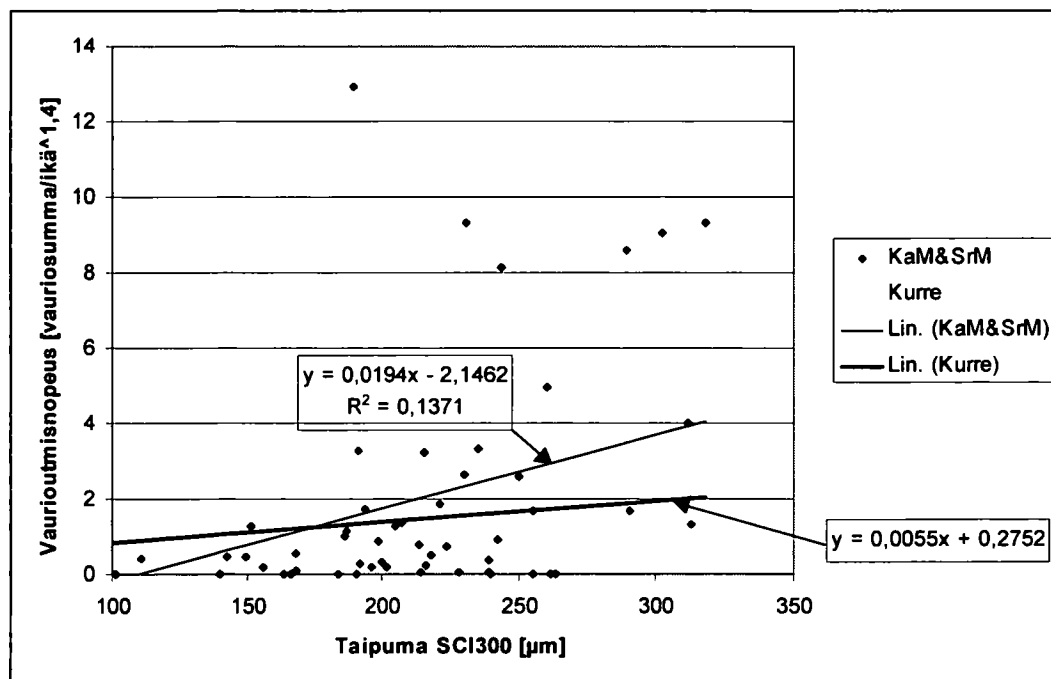
Kuva 7. Soramurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Soramurskeen hienoainespitoisuus vaikuttaa vaurioitumisnopeuteen huomattavasti lievemmin kuin kalliomurskeen hienoainespitoisuus. Tutkimusaineiston teillä ei löydetty soramurskeelle kalliomurskeen tapaan tiettyä hienoainespitoisuuden raja-arvoa, jonka jälkeen vaurioitumisnopeus kiihtyisi. Vaurioitumisnopeus näyttäisi soramursketeillä kasvavan tasaisesti hienoainespitoisuuden kasvaessa, mutta hienoainespitoisuuden vaikutus ($\#0.074 > 6\%$) vaurioitumisnopeuteen oli tämän tutkimusaineiston kalliomursketeillä noin 6-kertainen soramursketeiden vaurioitumisnopeuteen verrattuna.

3.5 Pudotuspainolaitteella mitatun taipuman yhteys tien vaurioitumisnopeuteen

Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välillä havaittiin olevan yhteyttä toisiinsa. Koko maan kuntotietorekisterin (Kurre) mitaustuloksia analysoimalla on johdettu yhteys pudotuspainolaitteen taipumaindeksin SCI300-arvon ja tien vaurioitumisnopeuden välille /4/. Tämä ns. Kurre-kaava on esitetty liitteessä 4. Tutkitaan, löytyykö tällä tutkimusaineistolla vastaava yhteys ja parantaako SCI300-arvon käyttäminen hienoainespitoisuudella saatua vaurioitumisnopeuden mallia

Kuvassa 8 on esitetty pudotuspainolaitteen taipuma-arvon SCI300 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.



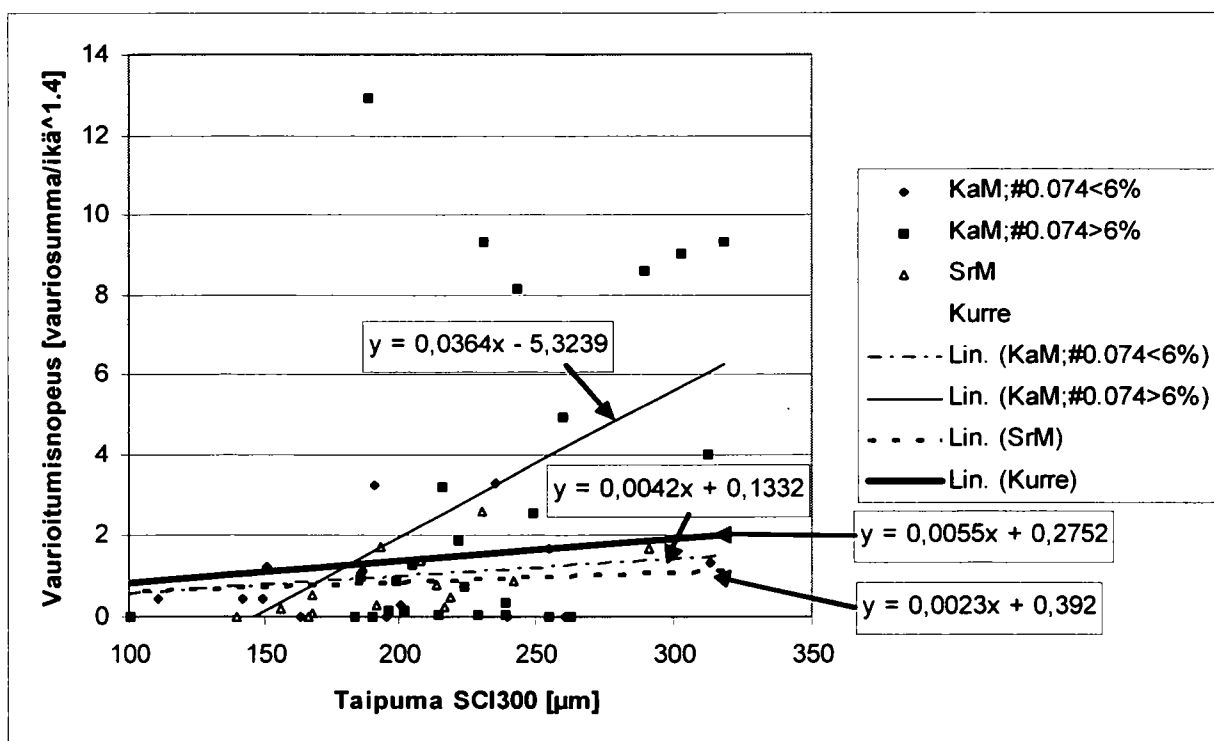
Kuva 8. Pudotuspainolaitteella tieltä mitatun taipuman SCI300 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen vuorosuhde.

SCI300-arvo on pudotuspainolaitteen 0-geofonin ja 300 mm:n päässä sijaitsevan geofonin välinen taipumaero. Mitä suurempi SCI300-arvo on, sitä huonompi on tien kantavan kerroksen kantavuus.

Kuvassa on esitetty koko mittausaineisto erottelematta sora- ja kalliomurskeitä. SCI300-arvon kasvaessa tien vaurioitumisnopeus kasvaa.

Liitteessä 5 esitettyä SCI300 arvolle kuntotietorekisteriaineistosta kehitettyä Kurre-kaavaa on sovellettu siten, että Kurre-kaavaan on sijoitettu tutkimusteitäin kaavan parametrit. Kurre-suoralla tien vaurioitumisnopeuden kasvaminen on noin kaksinkertaista mittausaineiston havainnoista piirrettyyn suoraan verrattuna. Tutkimusaineiston tiet ovat siten nopeammin vaurioituvia kuin Suomen tiet keskimäärin ovat. Tutkimustiet on tarkoituksella pyrittykin valitsemaan siten, että puolet teistä on nopeasti vaurioituvia ja puolet hitaasti vaurioituvia teitä. Tältä osin tutkimusteiden valintakriteeri on toteutunut. Kurre-suoran perusteella tien vaurioituminen alkaisi jo pienilläkin SCI300-arvoilla. Tämän tutkimuksen mukainen mukainen SCI-vaurioitumisnopeus suora leikkaa x-akselin SCI:n arvolla 105 μm , jota pienemmät SCI300-arvot eivät siten vaikuttaisi tutkimuksen mukaan tien vaurioitumisnopeuteen.

Kuvassa 9 on tutkittu tarkemmin, miten sora- ja kalliomursketeiden vaurioitumisnopeusero tulee näkyviin SCI300 suhteen tarkasteltuna. Samaan kuvaan on myös piirretty Kurre-kaavan mukainen suora.

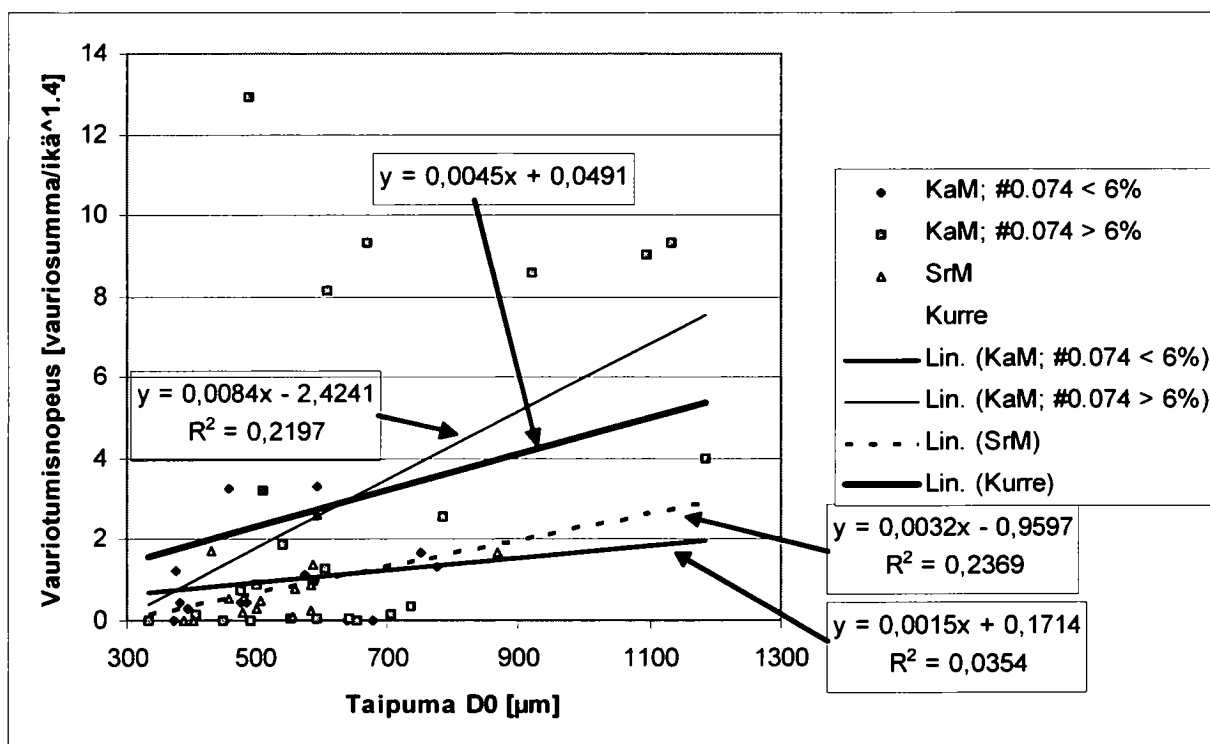


Kuva 9. Taipuman SCI300 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.
Vertailu Kurre-kaavalla laskettuun suoraan.

Hienoainespitoisuuden lisäksi SCI300 arvo näyttää selittävän teiden vaurioitumisnopeutta. Kantavan kerroksen hienoainesmäärän (#0.074) ollessa yli 6 % kalliomursketeillä tien vaurioitumisnopeus on lähes kolminkertainen sora- ja vähän hienoainesta sisältävien kalliomursketeiden vaurioitumisnopeuksiin nähden. Sora- ja vähän kantavassa kerroksessa hienoainesta (#0.074 < 6%) sisältävien kalliomursketeiden vaurioitumisnopeudet olivat tällä tutkimusaineistolla yhtäsuuret.

Liitteessä 4 esitettyä SCI300 arvolle kuntotietorekisteriaineistosta kehitettyä Kurre-kaavaa on sovellettu siten, että Kurre-kaavaan on sijoitettu tämän aineiston tutkimusteiden ominaisuudet. Kurre-suora on lähes samansuuntainen sora-
mursketeiden ja vähän hienoainesta sisältävien kalliomursketeiden suorien kanssa, mutta on näiden suorien yläpuolella. Tutkimuksen paljon hienoainesta sisältävien kalliomursketeiden ($\#0.074 > 6\%$) vaurioitumisnopeus on noin kolminkertainen Kurre-kaavalla laskettuun vaurioitumisnopeuteen nähden. Tulos on kärjistynyt, koska tutkimukseen valittiin vain hitaasti vaurioituvia ja nopeasti vaurioituvia teitä.

Kuvassa 10 on tehty samanlainen tarkastelu, kun taipumana on käytetty pudotuspainolaitteen taipumaa D0.

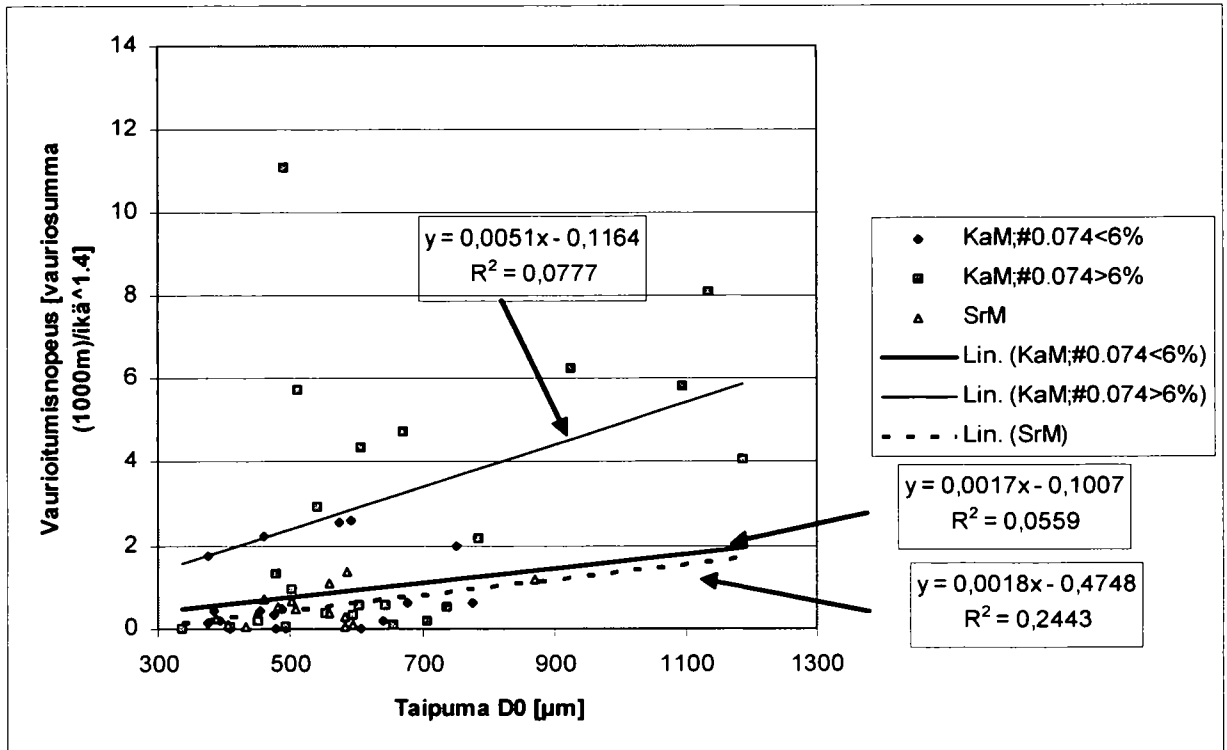


Kuva 10. Taipuman D0 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys sekä vertailu tutkimusaineiston parametreilla laskettuun Kurre-kaavan antamaan suoraan. Taipumalle D0 johdettu Kurre-kaava on esitetty liitteessä 5.

Taipuma D0 korreloi selvästi tien vaurioitumisnopeuden kanssa. Paljon hienoainesta sisältävällä ($\#0.074 > 6\%$) kalliomurskeella vaurioitumisnopeuden kasvu on noin 3.5-kertainen vähän hienoainesta ($\#0.074 < 6\%$) sisältävään kalliomurskeeseen verrattuna ja 2.5-kertainen sora-
murskeeseen verrattuna taipuman D0 kasvaessa. Kurre-kaavalla laskettu suora on hieman loivempi kuin kalliomurskesuora, jossa kalliomurske sisältää paljon hienoainesta.

D0:aa käytettäessä Kurre-suora on jyrkempi kuin SCI300:aa käytettäessä (vrt. kuva 9).

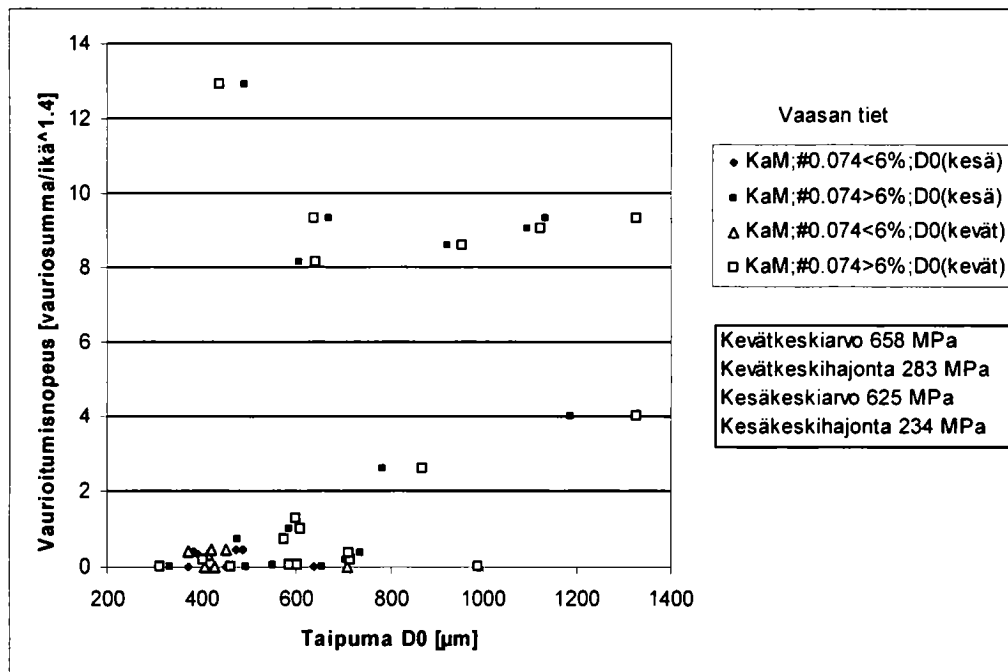
Kaikissa aiemmin esitetyissä kuvissa on vaurioitumisnopeuden laskennassa vauriosummana käytetty 100 m:n vauriosummaa näytteenottopaikan kohdalla. Tutkitaan, miten tulos muuttuu, jos vauriosummana käytetään 1000 m:n matkalla olevaa keskimääräistä 100 m:n vauriosummaa näytteenottopaikan kohdalla. Kuvassa 11 on vaurioitumisnopeuden laskennassa käytetty vauriosumma laskettu 1000 m matkan keskiarvolla.



Kuva 11. Taipuman D0 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys, kun vauriosumma on otettu 1000 m keskiarvona tutkimuspisteen ympäristössä.

Kuvia 10 ja 11 vertailemalla voidaan todeta, että taipuman D0 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys säilyy samantyyppisenä vauriosumman laskennassa käytetystä tiepituudesta riippumatta. Pieniä muutoksia on kuitenkin havaittavissa. Paljon hienoainesta sisältävällä kalliomurskeella saatu suora loivenee, kun vauriosumman laskennassa käytetään pitempää tiepituutta. Samoin loivenee soramurskeella saatu suora. Vähän hienoainesta sisältävällä kalliomurskeella taipuma D0- vaurioitumisnopeussuorat ovat samanlaisia vauriosumman laskentaperusteena olevasta tiepituudesta riippumatta. Pidempää vauriosumman laskentapituutta käytettäessä trendisuorien korrelaatiokertoimet huononevat entisestään.

Kuvassa 12 on tutkittu, miten taipuman mittausaika mahdollisesti vaikuttaa taipumaan ja sitä kautta saatuihin tuloksiin.



Kuva 12. Keväällä ja kesällä mitatut taipumat D0 ja niiden yhteys tien vaurioitumisnopeuteen.

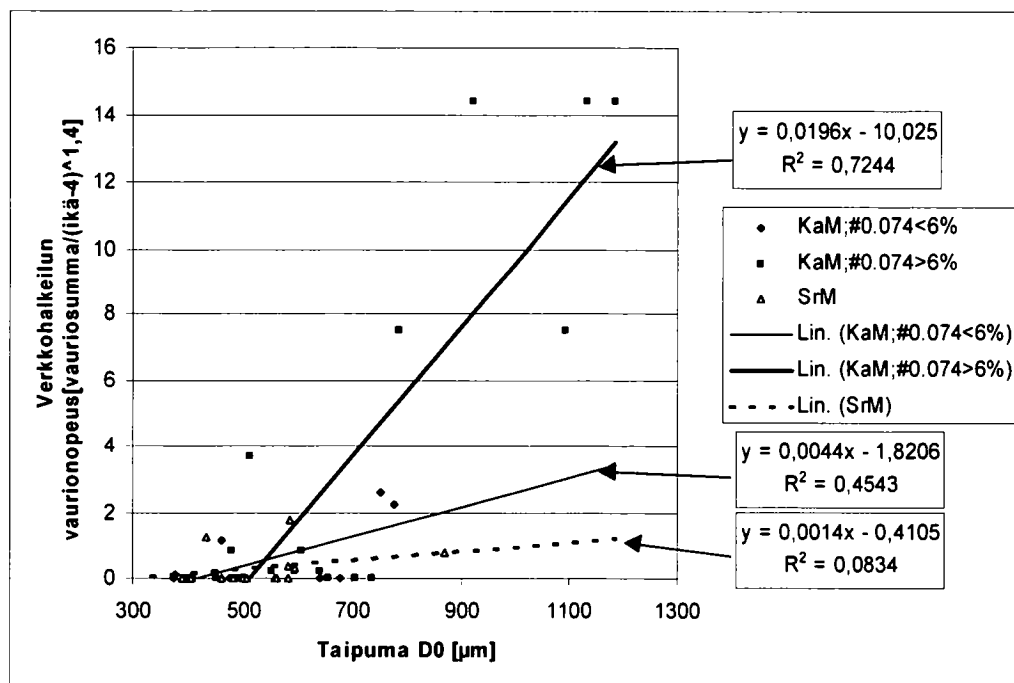
Kuvan mittausaineisto on Vaasan seudun tiestöllä, jossa oli käytettävissä sekä keväällä että kesällä mitatut kantavuudet täsmälleen samoilta paikoilta mitattuina. Kantava kerros on kalliomurskeesta.

Yleensä keväällä mitatut taipumat olivat tässä tutkimuksessa ainoastaan 0... 10 % kesällä mitattuja suurempia. Yksittäisissä pisteissä mitattiin keväällä 15 % kesämittausta suurempia taipuma-arvoja. Muutamissa pisteissä keväällä mitattu taipuma oli kesällä mitattua taipumaa pienempi, jolloin tie on todennäköisesti ollut kevätmittauksen aikaan vielä jäässä.

Mittauksen ajoittaminen kevään heikoimman kantavuuden aikaan tehtäväksi on mahdotonta, koska mittausolosuhteet vaihtelevat samallakin tiellä.

Mittausaika ei kuitenkaan näyttäisi muuttavan taipuman ja vaurioitumisnopeuden vuorosuhdetta tällä mittausaineistolla.

Kuvassa 13 vaurioitumisnopeuden laskennassa on huomioitu ainoastaan verkkohalkeilun aiheuttama vauriosumma.



Kuva 13. Taipuman D0 ja verkkohalkeilun aiheuttaman vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

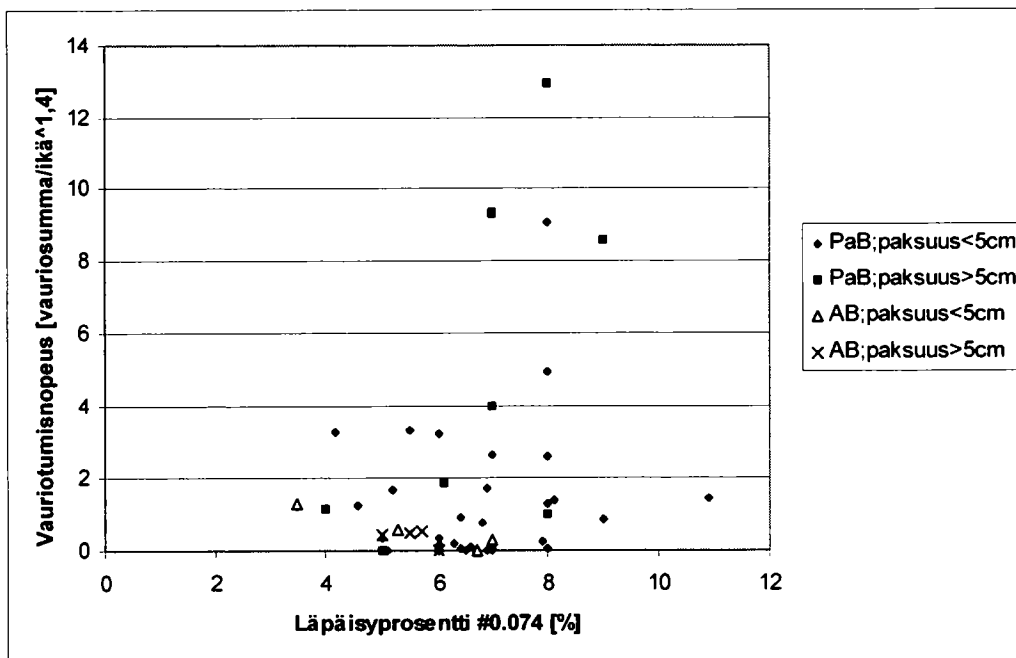
Verkkohalkeilu alkaa yleensä pituushalkeiluna. Vaurioinventoinnissa pituushalkeilun ja verkkohalkeilun raja on häilyvä. Ensimmäiset selvät verkkohalkeamat syntyvät yleensä vasta muutaman vuoden kuluttua tien päällystämisen jälkeen. Verkkohalkeilunopeuden kaavassa tämä on otettu ikätermissä huomioon siten, että päällysteiästä on vähennetty 4 vuotta. Tällä määrittelyllä 4 vuotta ja sitä nuoremmat kohteet eivät ole mukana laskelmassa (jakajaksi tulee 0 tai negatiivinen luku).

Tällä aineistolla taipuman D0 ja verkkohalkeilunopeuden välille näyttää löytyvän hyvä korrelaatio varsinkin paljon hienoainesta sisältävällä kalliomurskeella.

Soramurskeella vastaavaa yhteyttä ei tällä aineistolla ole.

3.6 Päälystepaksuuden ja päälystetyypin yhteys tien vaurioitumisnopeuteen

Päälystepaksuus ja päälystetyyppi saattaa vaikuttaa tienvaurioitumisnopeuteen. Kuvassa 14 on esitetty päälystepaksuuden yhteys tien vaurioitumisnopeuteen tällä tutkimusaineistolla.



Kuva 14. Hienoainespitoisuuden, päälystepaksuuden, päälystetyypin ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys havaintotieaineistolla.

Päälystepaksuuden avulla ei voida tällä aineistolla ennustaa tien tulevaa vaurioitumisnopeutta. Suuria vaurioitumisnopeuden arvoja esiintyy sekä alle 5 cm että yli 5 cm:n päälystepaksuuksilla, kun päälystetyyppinä on PaB. AB-päälysteillä kaikki mitatut vaurioitumisnopeuden arvot ovat pieniä.

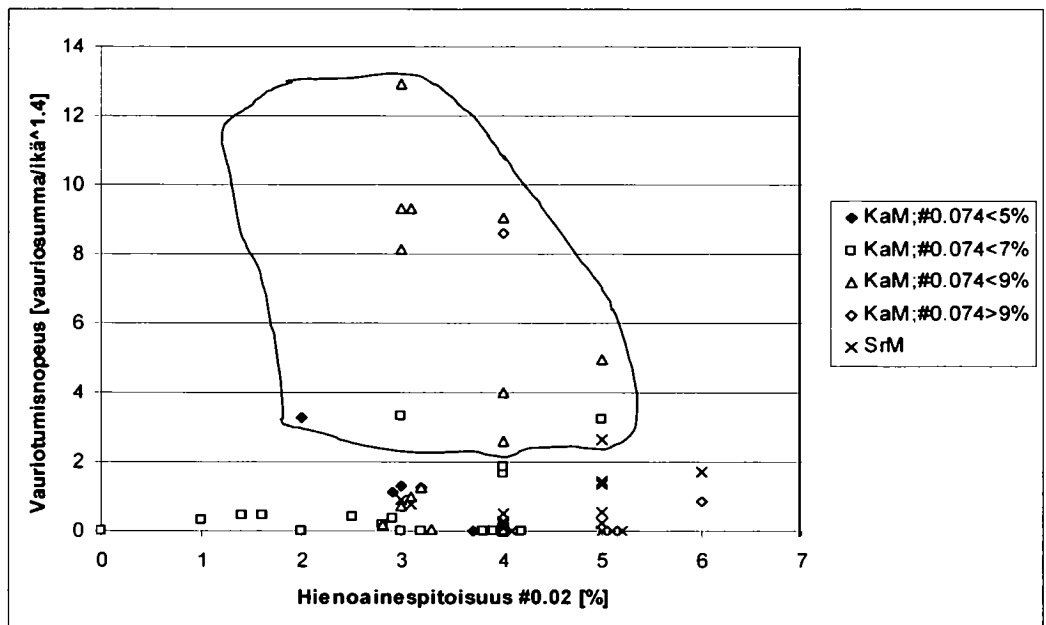
AB-päälysteisiä teitä oli tutkimusaineistossa hyvin vähän. AB-päälysteen kevytpäälysteitä suuremman moduulin lisäksi AB-päälysteisillä teillä tien rakennepaksuudet ovat yleensä suurempia kuin PaB-päälysteisillä teillä. Tulokseen voi vaikuttaa myös AB-päälysteen kevytpäälysteitä pienempi vedenläpäisevyys.

3.7 Muut laboratoriotutkimusmenetelmät

Seuraavaksi tutkitaan voidaanko muilla laboratoriotutkimuksilla parantaa tai korvata kantavan kerroksen hienoainespitoisuuteen #0.074 perustuvaa tien vaurioitumisnopeusmallia.

3.7.1 Hienoainespitoisuus #0.02

Kuvassa 15 on tutkittu, parantaako #0.02 läpäisyprosentin käyttäminen #0.074 läpäisyprosentin lisäksi hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välistä korrelaatiota.

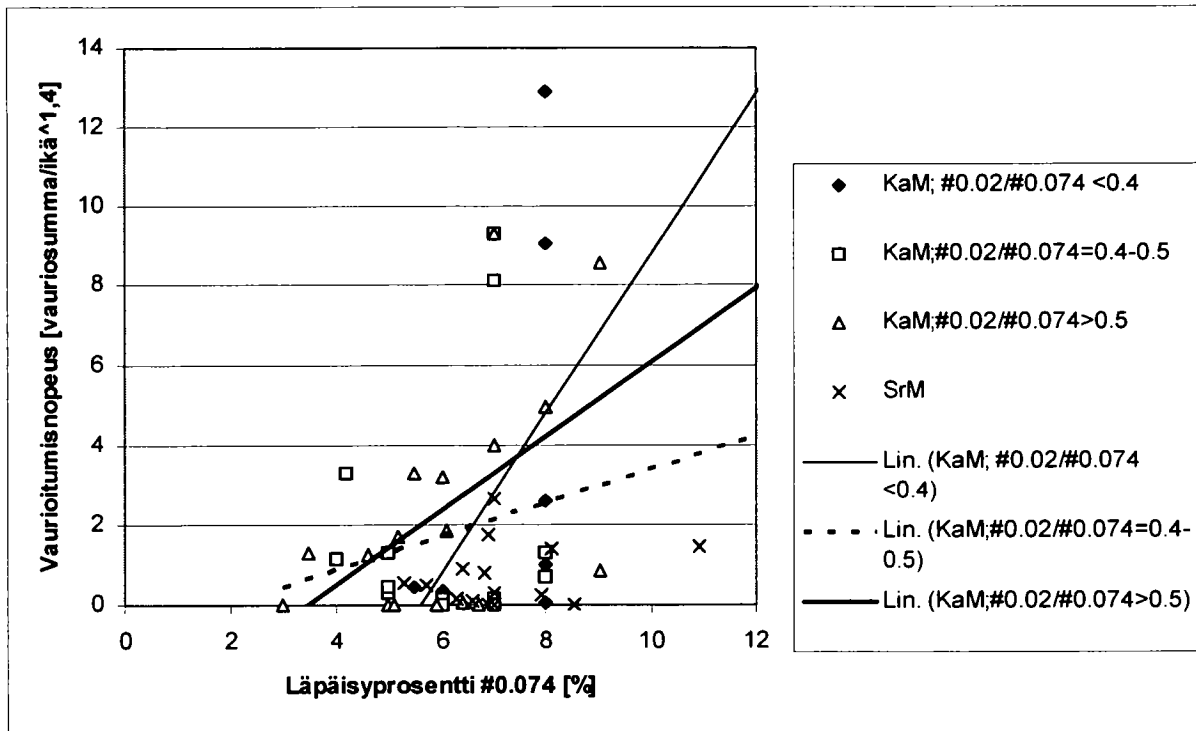


Kuva 15. Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden #0.02 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Kuvasta nähdään, että suureen vaurioitumisnopeuteen liittyy aina suuri 0.074 läpäisyprosentti (rengastettu alue), mutta ei välttämättä suurta 0.02 läpäisyprosenttia.

Hienoainespitoisuuden #0.02 käyttäminen ei tuo lisäarvoa läpäisyprosentin #0.074 lisäksi arvioitaessa hienoainespitoisuuden vaikutusta teiden vaurioitumisnopeuteen.

Kokeillaan, antaako hienoainespitoisuuksien suhteen #0.02/0.074 käyttäminen lisätarkkuutta hienoainespitoisuuden #0.074 perusteella laaditulle mallille. Kuvassa 16 tien vaurioitumisnopeus on esitetty hienoainespitoisuuden #0.074 funktiona ja lisämuuttujana on käytetty kalliomurskeen läpäisyprosenttien #0.02/#0.074 suhdetta.



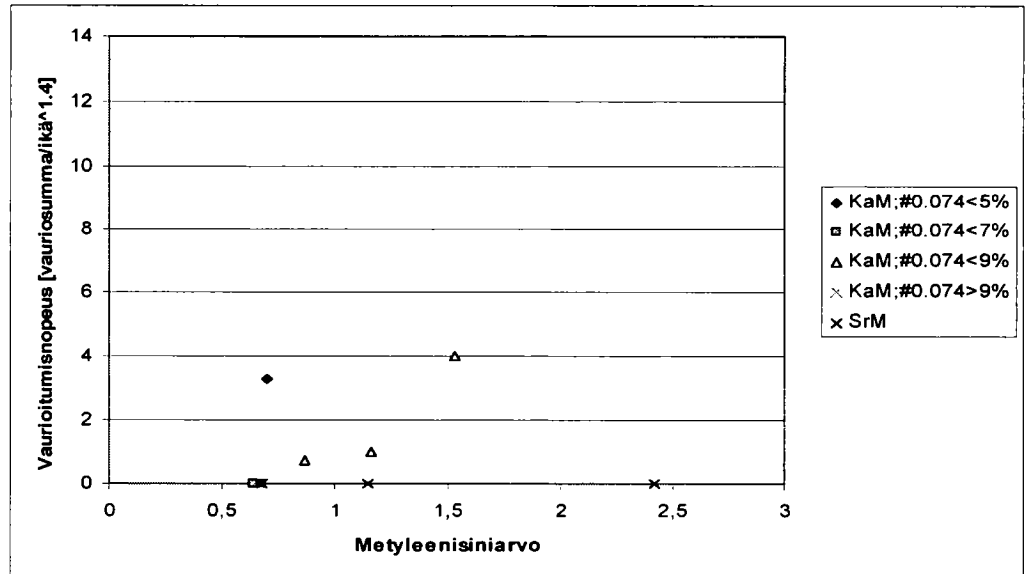
Kuva 16. Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden #0.02 ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Kuvasta nähdään, että otosryhmä, jossa läpäisyprosenttien #0.02/# 0.074 suhde on suurin (paksu viiva), ei aiheuta muita ryhmiä suurempaa vaurioitumisnopeutta.

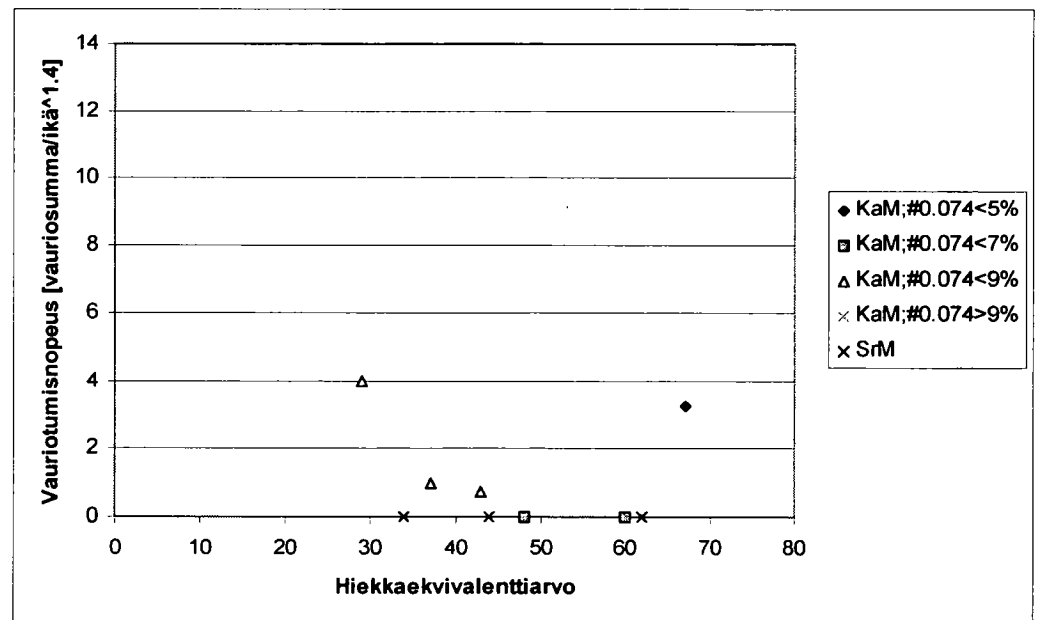
Läpäisyprosenttien suhde #0.02/#0.074 ei siten anna merkittävää lisätarkkuutta hienoainespitoisuuden vaikutuksesta tien vaurioitumisnopeuteen.

3.7.2 Metyleenisiniarvo ja hiekkakvivalenttiarvo

Kuvissa 17 a ja b on esitetty kantavan kerroksen metyleenisiniarvon ja hiekkakvivalenttiarvon yhteys tien vaurioitumisnopeuteen.



a)



b)

Kuva 17. Kantavan kerroksen murskeen metyleenisiniarvon (17 a) ja hiekkakvivalenttiarvon (17b) yhteys tien vaurioitumisnopeuteen.

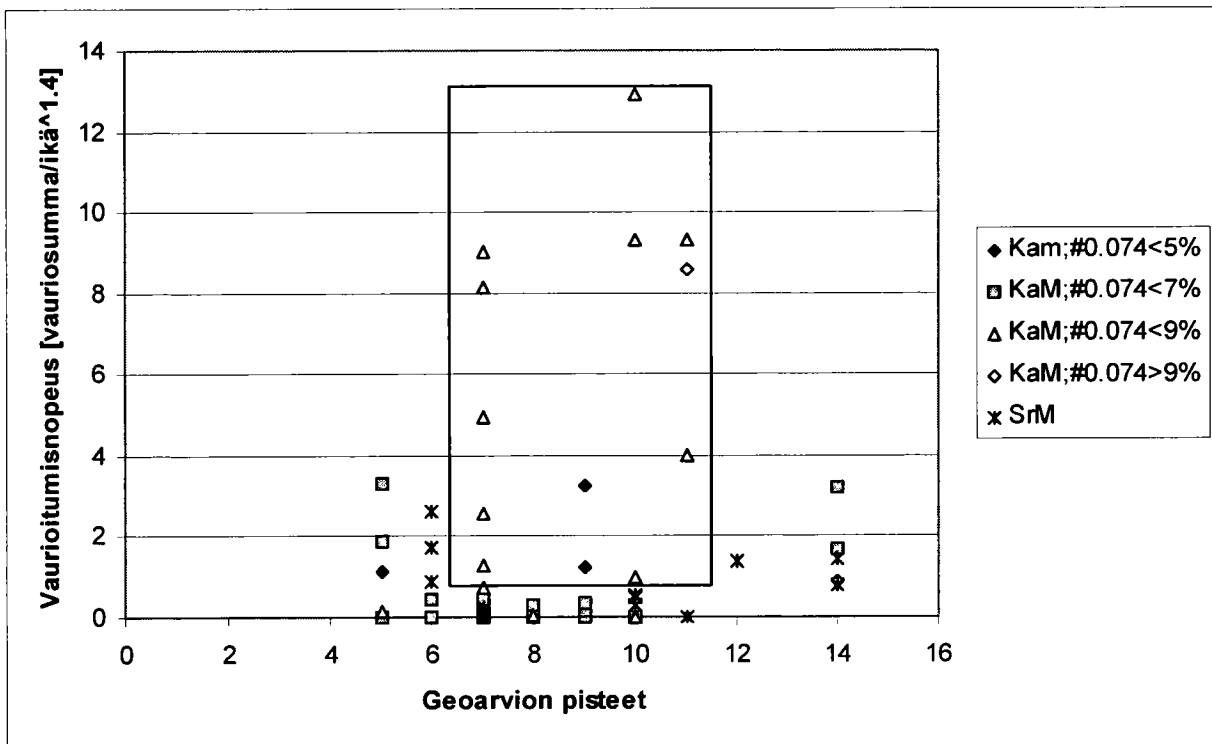
Metyleenisinitestit ja hiekkakvivalenttikokeet tehtiin samoille näytteille (9 kpl). Näyttää siltä, ettei metyleenisiniarvo eikä hiekkakvivalenttia anna merkittävää lisäarvoa hienoainespitoisuuden rinnalle arvioitaessa tien vaurioitumisnopeutta. Varsinkin metyleenisinikoe on kokeena työläs ja sen alkuperäinen tarkoitus on tunnistaa paisuvahilaiset maalajit. Hiekkakvivalenttikoe muistuttaa koemenetelyltään lietekoetta ja sillä on yhteys rakeisuusmäärittelyn kanssa (vrt. kuva 27).

3.7.3 Geoarvion pisteet, mineraalikoko ja killepitoisuus

Tutkimuksen yhteydessä kehitettiin ns. geoarviointimenettely kiviaineksen kelpoisuuden toteamiseksi. Geoarvio on tarkoitettu käytettäväksi erityisesti maa-ainespaikkojen etsintä- ja valintavaiheessa, jolloin kiviraaka-aines saa pisteitä 4 – 17. Pienin pistemäärä on paras. Pisteitä annetaan mineraalikoon, pehmeiden mineraalien, sulfidien ja pehmeiden mineraalien esiintymistavan perusteella. Pisteytys on esitetty liitteessä 6.

Varsinkin kalliomurskeilla tarvittaisiin tämäntyyppinen yksinkertainen testimenetelmä, jolla voitaisiin nykyistä luotettavammin ennakoida kiviaineksen pitkäaikaiset muodonmuutosominaisuudet sitomattomassa kantavassa kerroksessa jo maa-ainespaikan tutkimusvaiheessa.

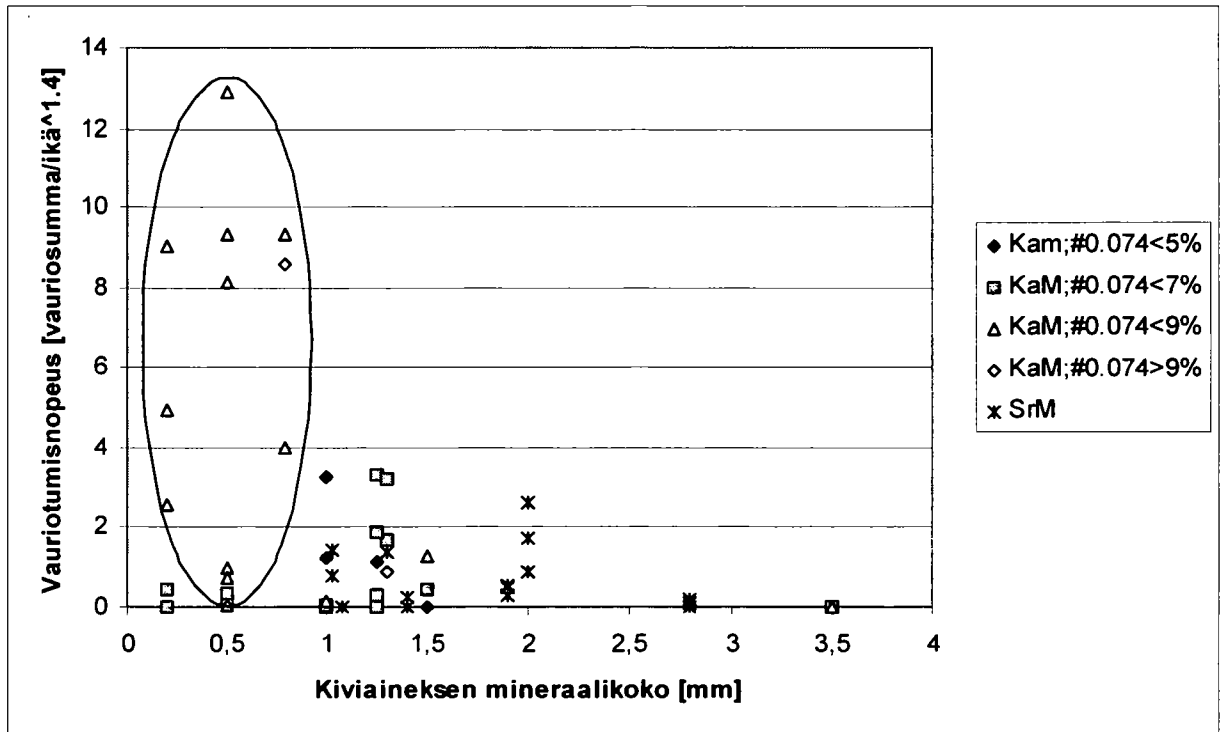
Kuvassa 18 on esitetty kantavan kerroksen murskeen geoarvion pisteiden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.



Kuva 18. Kantavan kerroksen murskeen geoarvion pisteiden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Kuvassa suuria hienoainespitoisuuksia ja vaurioitumisnopeuksia esiintyy lähinnä suorakaiteella rajatulla alueella. Myöskään kehystetyn alueen ulkopuolella geoarviopisteytys ei ennusta tien tulevaa vaurioitumisnopeutta. Tästä voidaan päätellä, että geoarviointipisteytys ei paranna hienoainespitoisuuden perusteella tehtyä tien vaurioitumismallia.

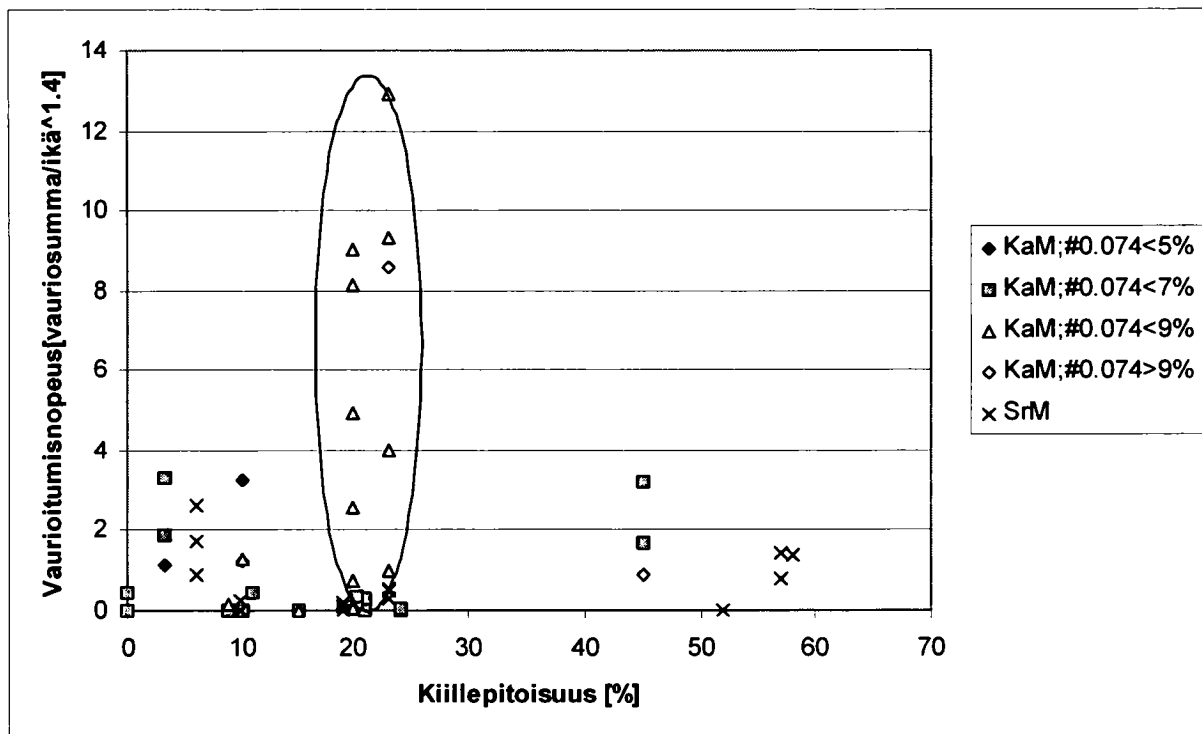
Tarkastellaan seuraavaksi erikseen geoarviointimenettelyyn sisältyviä kiviaineksen mineraalikokoa ja kiillepitoisuutta sekä tien vaurioitumisnopeuden välisiä yhteyksiä. Kantavan kerroksen kiviaineksen mineraalikoosta yhteys tien vaurioitumiseen on esitetty kuvassa 19 ja kiillepitoisuuden osalta vastaavasti kuvassa 20.



Kuva 19. Kantavan kerroksen kiviaineksen mineraalikoosta ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Suuria tien vaurioitumisnopeuksia esiintyy vain rengastetulla alueella, jossa hienoainespitoisuus #0.074 on suuri. Kuvasta nähdään, että suuria hienoainespitoisuuksia esiintyy tällä aineistolla vain silloin, kun myös kiviaineksen mineraalikoko on pieni.

Nämä kalliomurskeet sijaitsevat Vaasan tiepiirin alueella. Tutkimuksessa Vaasan alueella on mukana noin 10 eri kalliopaikkaa, mutta kivimineraalit ovat suurimmaksi osaksi graniitteja ja gneissejä. Aineisto on siten tältä osin kivilajien suhteen valikoitunutta ja em. suurien tien vaurioitumisnopeuksien keskittyminen 0,5 mm mineraalikoosta johtuneen samantyyppisten kivilajeista.



Kuva 20. Kantavan kerroksen murskeen kiillepitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

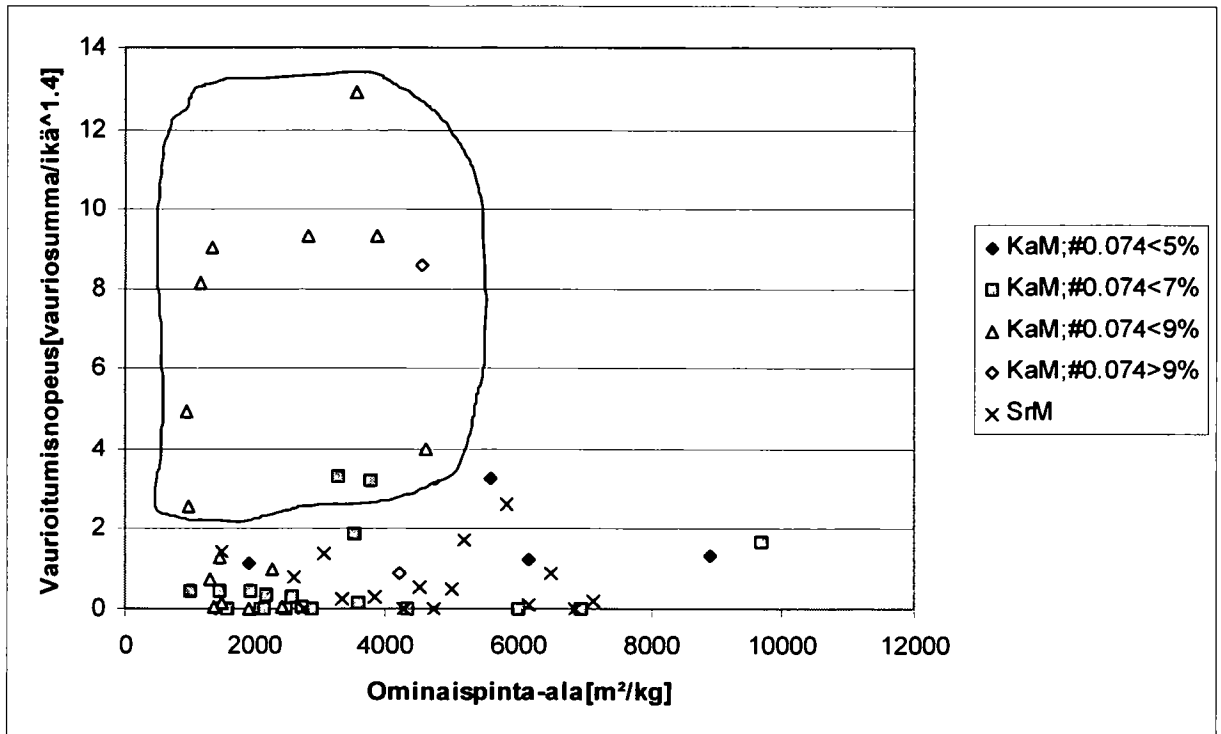
Kiillepitoisuus ei paranna hienoainespitoisuuden perusteella laadittua mallia tien vaurioitumisnopeudesta. Kuvassa kiinnittyy huomio rengastetulla alueeseen, jossa pääasiassa esiintyy suuria vaurioitumisnopeuksia. Tällä kohdalla myös kantavan kerroksen hienoainespitoisuus on suuri. Suuri vaurioitumisnopeus esiintyy noin 20 %:n kiillepitoisuuden kohdalla.

Nämä kalliomurskeet sijaitsevat Vaasan tiepiirin alueella. Tutkimuksessa Vaasan alueella on mukana noin 10 eri kalliopaikkaa, mutta kivimineraalit ovat suurimmaksi osaksi graniitteja ja gneissejä. Aineisto on siten tältä osin kivilajien suhteen valikoitunutta ja em. suurien tien vaurioitumisnopeuksien keskittyminen 20 %:n kohdalle johtunee samanlaisista kivilajeista.

Käytännön tiehankkeissa on havaittu, että suuri kiillepitoisuus on riski. Märissä olosuhteissa kiillepitoisesta kivistä rakennettu kantava kerros saattaa menettää lähes kokonaan kantavuutensa kiviaineksen rapautuessa. Tästä syystä kantavan kerroksen kiviainekselle sallitun kiillepitoisuuden rajoittaminen esim. alle 10 ... 15 %:n voisi olla perusteltu ratkaisu.

3.7.4 Kiviaineksen ominaispinta-ala ja veden adsorptio

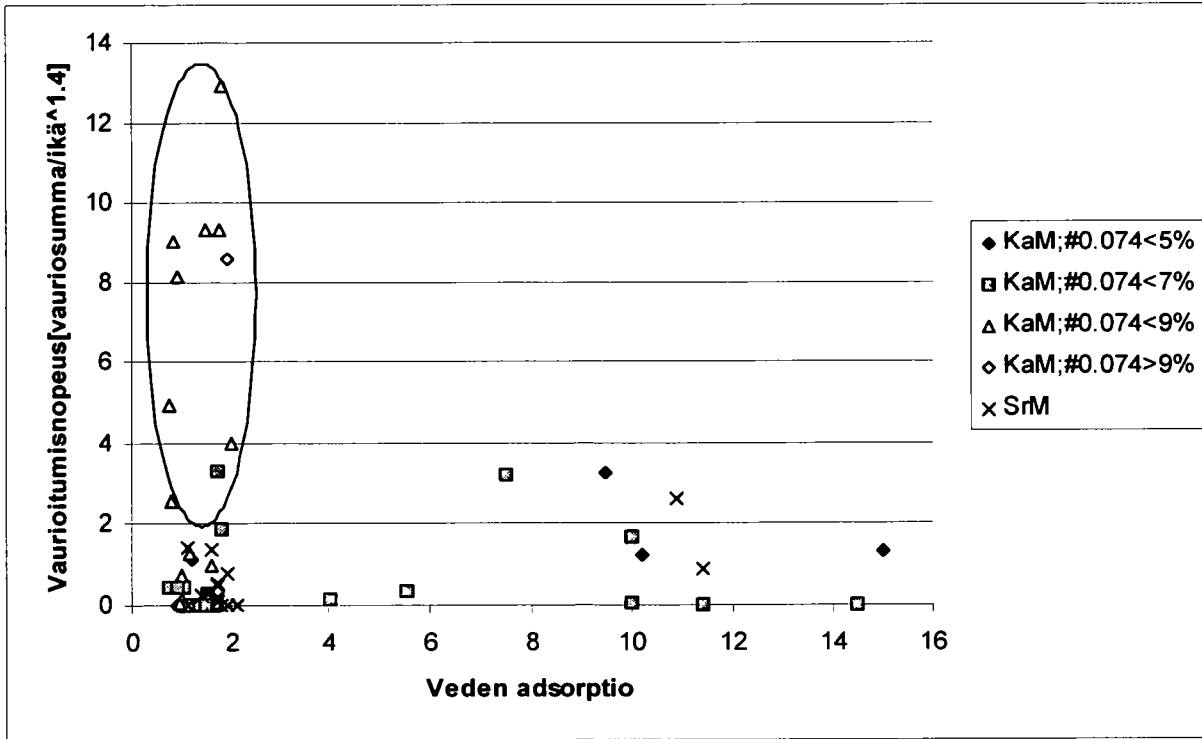
Antaisiko murskeen ominaispinta-ala lisätarkkuutta tien vaurioitumisnopeuden ennustamiseen? Asiaa on tarkasteltu kuvassa 21.



Kuva 21. Kantavan kerroksen murskeen ominaispinta-alan ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Kuvasta nähdään, että ainoastaan ominaispinta-alaan perustuen ei voida ennustaa tien vaurioitumisnopeutta. Suuret vaurioitumisnopeuden arvot keskittyvät lähinnä rengastetulle alueelle, jossa hienoainespitoisuus on suurin. Lisäksi huomataan, että hyvin suurillakaan ominaispinta-alan arvoilla tien vaurioitumisnopeus ei kasva tällä tutkimusaineistolla.

Veden adsorptiota on käytetty kiviaineksen vedenherkkyuden mittarina ja kiviaineksen kelpoisuuden arviointimenetelmänä. Tutkitaan, onko tällä tutkimusaineistolla kantavan kerroksen murskeen veden adsorptiolla ja tien vaurioitumisnopeudella yhteyttä toisiinsa. Asiaa on tarkasteltu kuvassa 22.

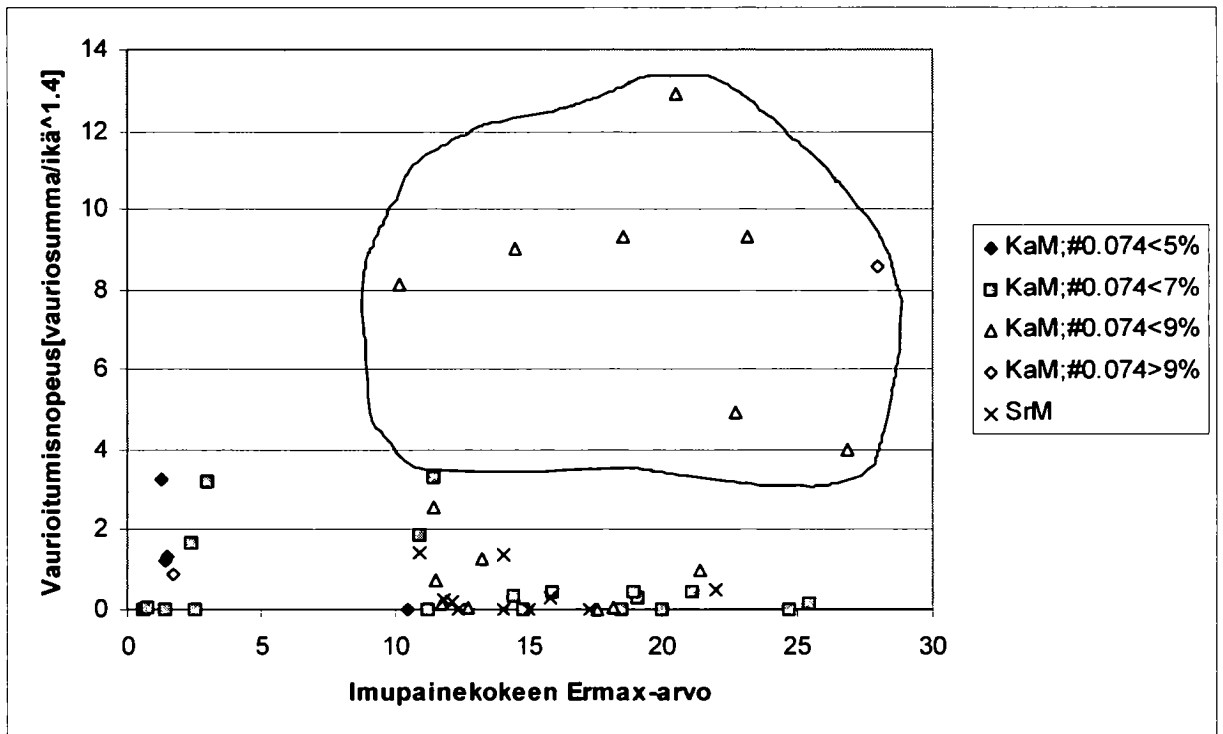


Kuva 22. Kantavan kerroksen murskeen veden adsorption ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Kuvasta nähdään, että tien vaurioitumisnopeus on suurin rengastetulla alueella, jossa veden adsorptio saa pienimmät arvonsa (< 2). Kiviaineksen laatukriteerien mukaan kiviaines on sitä parempaa mitä pienempi on veden adsorptio. Tien vaurioitumisnopeuden suhteen veden adsorptio näyttäisi toimivan päinvastoin! Tosin pieniä veden adsorptioarvoja lukuunottamatta tien vaurioitumisnopeus näyttäisi olevan samaa suuruusluokkaa veden adsorptiosta riippumatta. Rengastetulla alueella kantavan kerroksen murskeen hienoainespitoisuus saa suuria arvoja ja siten veden adsorptiokaan ei paranna hienoainespitoisuuteen perustuvaa tien vaurioitumisnopeuden ennustemallia.

3.7.5 Imupainekoe (Tube suction)

Uusin kiviaineksen vedenherkkyyden mittaamiseen kehitetty menetelmä on imupainekoe (tube suction) /9, 10/. Kuvassa 23 on tarkasteltu imupainekokeen tulosten yhteyttä tien vaurioitumisnopeuteen.



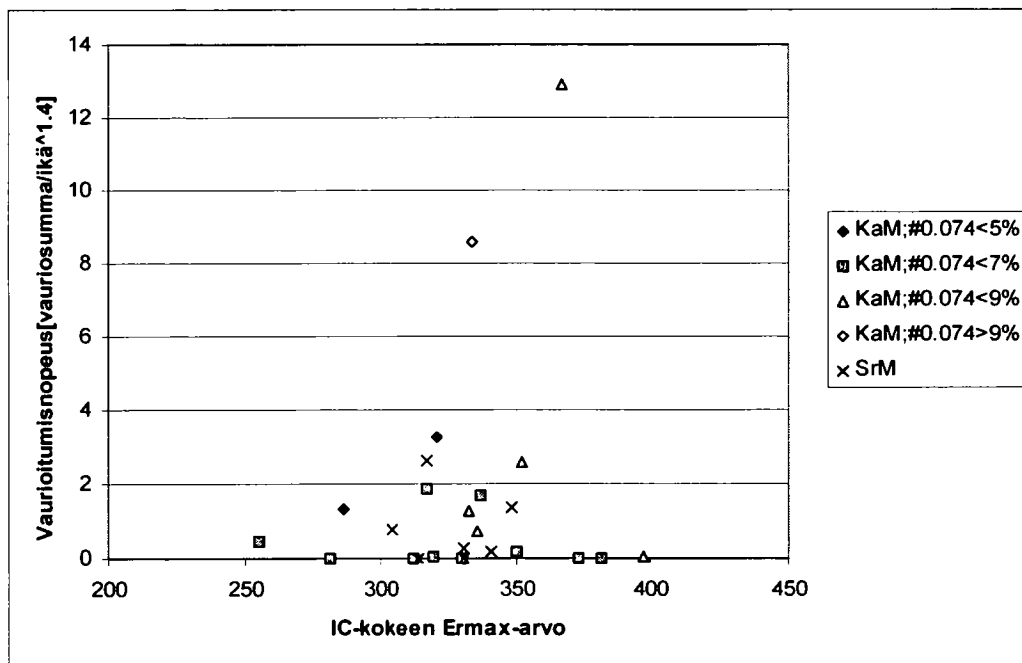
Kuva 23. Kantavan kerroksen murskeen imupainekokeessa mitatun Ermax-arvon ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.

Kuvasta nähdään, että suuria tien vaurioitumisnopeuden arvoja esiintyy imupainekokeen Ermax-arvon ollessa yli 10. Toisaalta Ermax-arvon ollessa yli 10 esiintyy myös pieniä tien vaurioitumisnopeuden arvoja. Siten imupainekokeen Ermax-arvolla ei voida ennustaa tämän aineiston perusteella tien tulevaa vaurioitumisnopeutta. Rengastetulla alueella kantavan kerroksen hienoainespitoisuus on suuri, joten imupainekoe ei tässä tapauksessa näytä tuovan lisätarkkuutta tien vaurioitumisnopeuden ennustamiseen. Imupainekokeen Ermax-arvon perusteella ei voida tällä aineistolla ennustaa tulevaa tien vaurioitumisnopeutta rengastetun alueen ulkopuolellakaan.

Imupainekokeen muut parametrit (esim. nousukulma) eivät myöskään anna lisäarvoa hienoainespitoisuuden perusteella laaditulle tien vaurioitumisnopeuden ennustemallille.

3.7.6 Kiertotiivistyskoe (IC-koe)

Kuvassa 24 on esitetty kantavan kerroksen murskeen IC-kokeen /8/ maksimileikkauslujuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys.



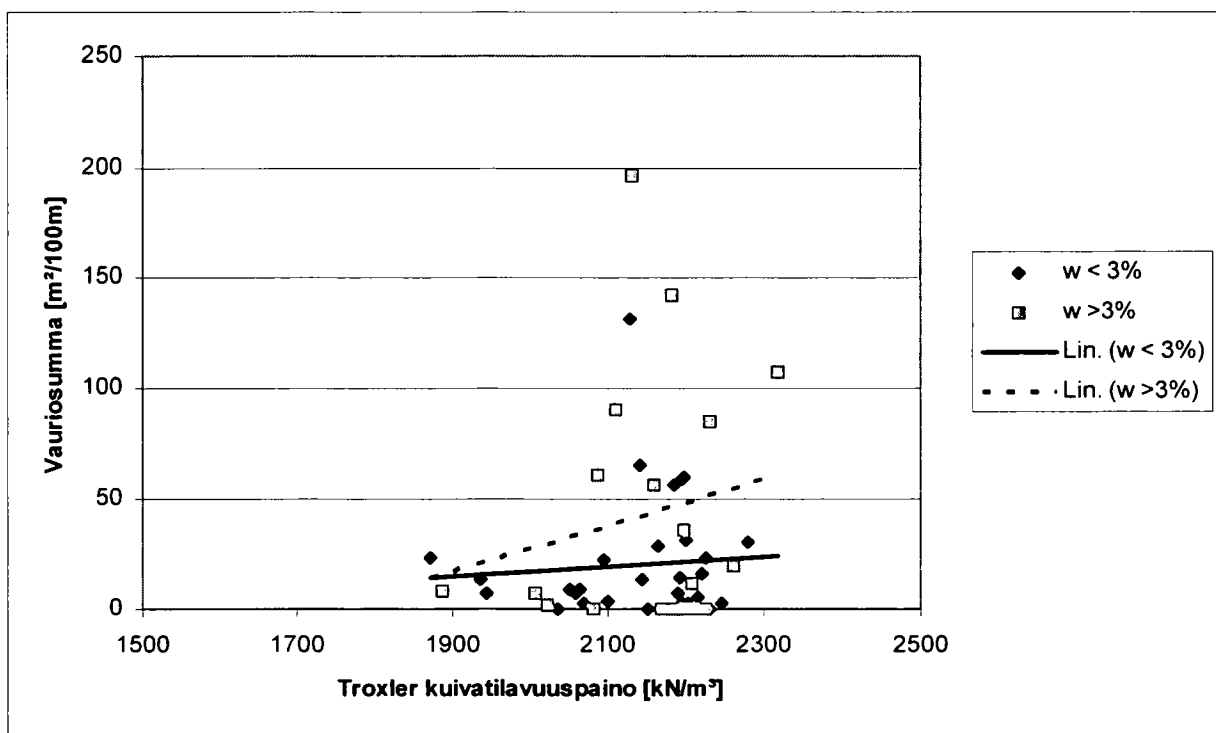
Kuva 24. Kantavan kerroksen murskeen IC-kokeen leikkausvastuksen maksimiarvon vaikutus tien vaurioitumisnopeuteen.

IC-kokeen maksimileikkausvastuksen avulla ei voida ennustaa tien vaurioitumisnopeutta. Tässä tutkimusaineisto on pieni, koska IC-koetta ei tehty kaikille kantavan kerroksen näytteille.

IC-laitteella on mahdollista karkeasti määrittää sitomattoman kiviaineksen moduuli /8/. Lisäksi sitä voidaan käyttää testausmenetelmänä, jolla selvitetään sitomattoman kantavan kerroksen herkkyyttä hienontua rakennusaikana /2/.

3.7.7 Troxler-tiiveys ja vesipitoisuus

Kuvassa 25 on esitetty kantavan kerroksen murskeen Troxler-tiivyyden ja vesipitoisuuden yhteys tien vaurioitumisnopeuteen.



Kuva 25. Troxler tiivyyden ja vesipitoisuuden yhteys tien vauriosummaan.

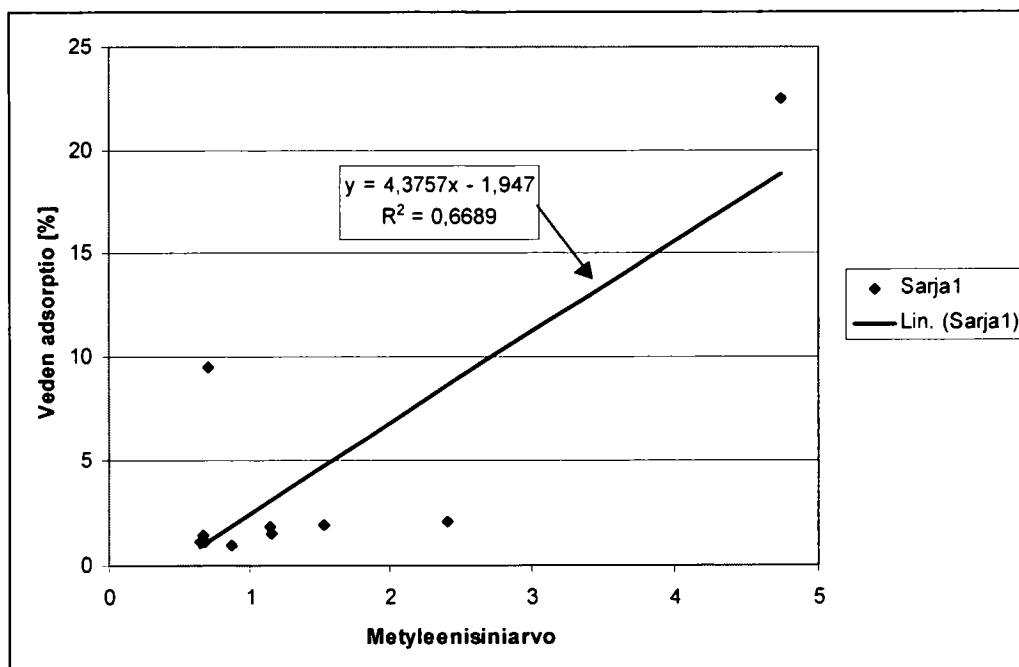
Kun kantavan kerroksen vesipitoisuus on alle 3% ei Troxler tiivyyden kasvaminen juuri lisää tien vaurioitumisnopeutta. Vesipitoisuuden ollessa yli 3 % kasvaa tien vaurioitumisnopeus voimakkaasti Troxler-tiivyyden kasvaessa.

Suuri vauriosumma näyttäisi selittävän suurta vesipitoisuutta. Kun vauriosumma on suuri, tiessä on halkeamia, joista vesi pääsee helpommin kantavaan kerrokseen.

3.8 Eräiden muuttujien välisiä yhteyksiä

3.8.1 Metyleenisiniarvon ja veden adsorption välinen yhteys

Kuvassa 26 on esitetty metyleenisiniarvon ja veden adsorption välinen yhteys.

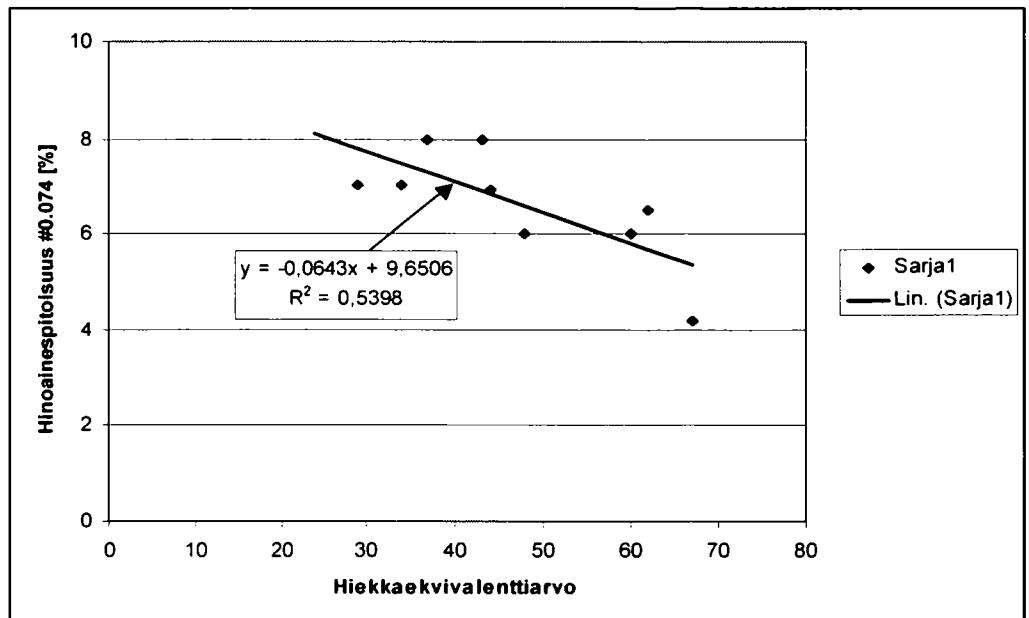


Kuva 26. Kantavan kerroksen murskeen metyleenisiniarvon ja veden adsorption välinen yhteys

Veden adsorptiolla ja metyleenisiniarvolla näyttäisi tämän aineiston perusteella olevan yhteys keskenään. Koemäärä on tosin hyvin pieni. Metyleenisinitesti on EN-standardin mukainen virallinen menetelmä. Koemenetelmänä se ei näyttäisi tuovan mitään uutta lisäarvoa suomalaisiin käytössä oleviin menetelmiin nähden.

3.8.2 Hiekkaekvivalenttiarvon ja hienoainespitoisuuden # 0.074 välinen yhteys

Toista EN-standardin menetelmää, hiekkaekvivalenttiarvon määrittystä, on kuvassa 27 vertailtu hienoainespitoisuuden kanssa.

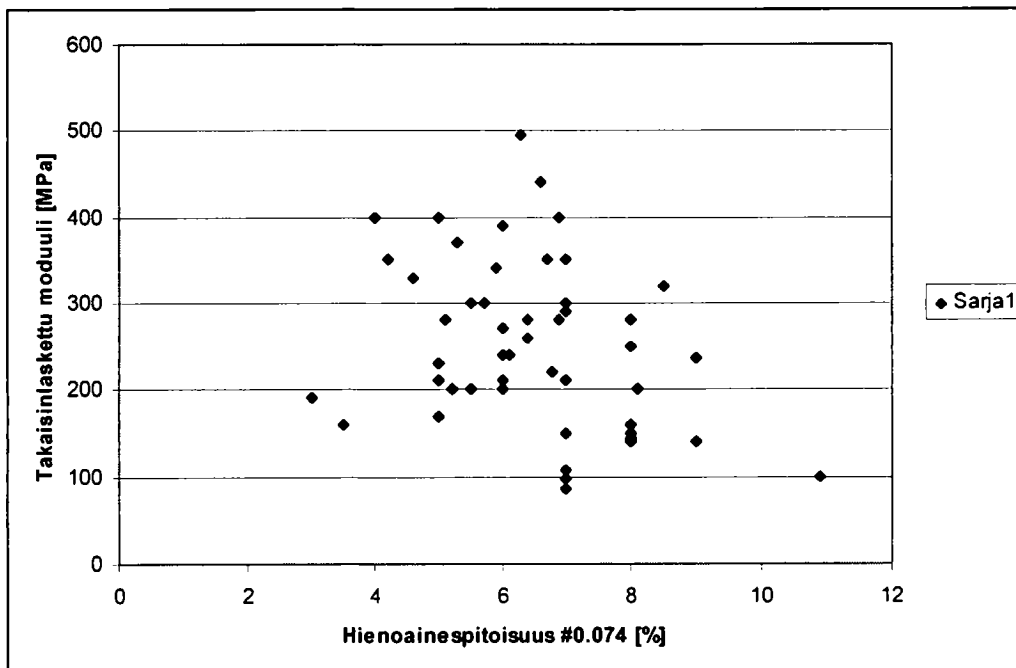


Kuva 27. Kantavan kerroksen murskeen hiekkaekvivalenttiarvon ja hienoainespitoisuuden #0.074 välinen yhteys.

Hiekkaekvivalenttiarvo näyttää puolestaan olevan kuvan mukaisesti kääntäen verrannollinen hienoainespitoisuuden kanssa. Koemäärä on myös tässä hyvin pieni.

3.8.3 Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden ja kantavuusmittauksista takaisinlasketun kerrosmoduulin välinen yhteys

Kuvassa 28 on tutkittu, onko hienoainespitoisuudella ja takaisinlasketulla kerrosmoduulilla yhteyttä toisiinsa.



Kuva 28 . Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden #0.074 ja takaisinlasketun moduulin välinen yhteys

Kantavan kerroksen hienoainespitoisuuden perusteella ei kuvan 28 perusteella voi luotettavasti ennustaa takaisinlasketun kantavan kerroksen moduulin suuruutta. Siihen olisi löydettävä luotettava yksinkertainen laboratoriomenetelmä.

Suuri hienoainespitoisuus ei tavallisesti näy taipumamittauksissa. Kuvan 28 tapauksessa suuri hienoainespitoisuus voi päinvastoin suurentaa moduulia ja näennäisesti parantaa kantavuutta. Toisaalta kantavuusmittaustuloksesta ei voida suoraan päätellä kantavan kerroksen hienoainespitoisuutta, vaan se on tutkittava rakeisuusnäytteestä.

4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen yksi päätavoitteista oli löytää paras mahdollinen sitomattoman kantavan kerroksen murskeen laatumuuttujan ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys. Sitomattoman kantavan kerroksen hienoainespitoisuus ja toisaalta murskeen raaka-ainetyyppi sora- vai kalliomurske selittivät ylivoimaisesti parhaiten tutkimusteiden vaurioitumisnopeutta. Muut laboratoriotutkimukset (0,02 mm, metyleenisini, hiekkaekvivalentti, mineraalikoko, kiillepitoisuus, ominaispinta-ala, veden adsorptio, imupainekoe, kiertotiivistyskoe) eivät parantaneet merkittävästi tai lainkaan hienoainespitoisuuden perusteella laadittua tien vaurioitumisnopeuden mallia.

Tien päällysteen vaurioituminen kiihtyy hienoainespitoisuuden kasvaessa, jos kantavan kerroksen kalliomurskeen hienoainespitoisuus ylittää 6 %. Soramurskeella vastaavaa rajaa ei löytynyt.

Hienoainespitoisuuden ohella pudotuspainolaitteella mitattu taipumaindeksi SCI300 ja taipuma D0 selittivät tutkimusteiden vaurioitumista. Vertailu kuntotietorekisterin (Kurre) vaurioitumismalleihin osoitti tässä tutkimuksessa olevien kalliomursketeiden (sitomaton kantava kalliomurskeesta) olevan keskimääräistä selvästi nopeammin vaurioituvia. Tämä johtuu tutkimusaineiston valintaperusteista.

Tutkimuksen mahdollisia virhelähteitä tunnistettiin kaksi. Hienoainespitoisimmat kalliomurskeet, joihin liittyi nopein vaurioituminen, sijaitsivat Vaasan seudulla. Voisiko kiviaineksiin sisältyä muita tutkimuksessa käsittelemättä jääneitä ominaisuuksia, jotka kiihdyttävät vaurioitumista? Toinen virhelähde liittyy päällysteisiin. Päällysteet on voitu tehdä samasta ongelmallisesta kivistä kuin kantava kerros, ja päällysteen laatu on vaikuttanut samansuuntaisesti vaurioitumiseen.

5 KIRJALLISUUTTA

1. Belt, J. 1998. Sitomattoman kantavan kerroksen laadun vaikutus päällysteen kestävyYTEEN. Esiselvitys. Julkaisematon.
2. Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. 1994. Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen. Tielaitoksen selvityksiä 53/1994. 63 s.
3. Ehrola, E. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki. 365 s.
4. Järvinen, S. 2001. Vaurioitumismallit kuntorekisteriaineistossa rakenteen suunnitteluohjeita varten (1999 – 2001).
5. Kolisoja, P. 1996 a. Sitomattomien materiaalien moduulit. Vuoden 1995 kokeet. Tielaitoksen selvityksiä 34/1996. TIEL 3200402. Tielaitos. Helsinki. 119
6. Kolisoja, P. 1996 b. Sitomattomien materiaalien moduulit. Muodonmuutosmoduulin arviointimenettely. Tielaitoksen selvityksiä 44/1996. TIEL 3200412. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki. 84 s.
7. Kolisoja, P. 1997. Resilient deformation characteristics of granular materials. Väitöskirja, Tampereen teknillinen korkeakoulu. Julkaisu numero 223. 216 s.
8. Laaksonen, R., Nordenswan, E., Paakkinen, I., Alkio, R., Törnqvist, J. 1999. ICT-moduuli. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 365/1999. Espoo. 44s.
9. Saarenketo, T. 1998. Sitomattoman kantavan kerroksen mekanististermodynaamiset ominaisuudet ja niiden sähköiset tutkimusmenetelmät. Esiselvitys. Julkaisematon.
10. Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Ylitapio, S. 2001. Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001. TIEL 3200657. Helsinki. 20s.

6 LIITTEET

Näytteiden ottopaikat	Liite 1
Kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys	Liite 2
Kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys	Liite 3
Vauriosummaennusteet ja toteutuma SCI300:n suhteen	Liite 4
SCI300 arvolle kuntotietorekisteriaineistosta kehitetty Kurre-kaava	Liite 5
Geoarviointimenettelyn pisteytys	Liite 6

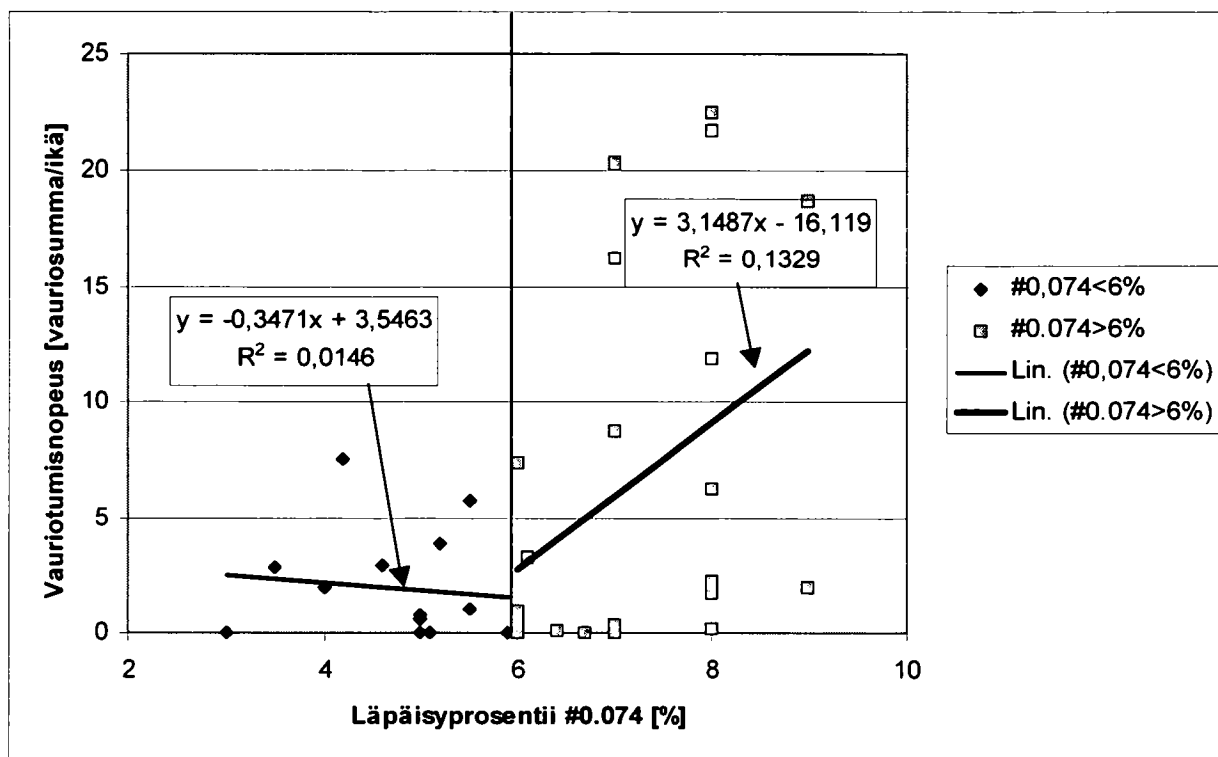
Sitomattoman kantavan kerroksen murskeen laadun vaikutus tien vaurioitumiseen
LIITTEET

Näytteiden ottopaikat

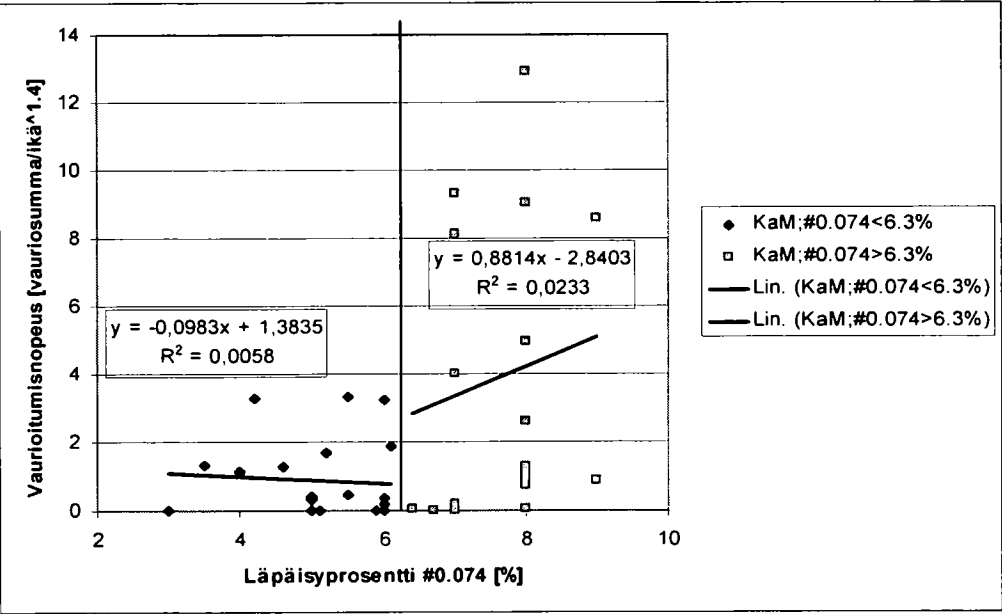
Näyte- paikka	Tie- numero	Tieosa- numero	Paalu	Näyte- paikka	Tie- numero	Tieosa- numero	Paalu
1	63	5	670	40	7830	2	1950
2	63	5	1190	41	7830	2	3137
3	63	5	2590	42	8341	2	5158
4	63	8	480	43	8341	2	6277
5	63	8	2000	44	8361	1	1715
6	63	10	600	45	8361	1	2475
7	63	10	1600	46	18741	1	545
8	682	3	500	47	18741	1	1296
9	682	3	2500	48	18741	1	2357
10	723	2	300	49	381	5	1560
11	723	2	1000	50	381	6	2595
12	747	1	3350	51	381	6	2870
13	747	1	6100	52	428	2	1860
14	747	2	1060	53	428	2	2860
15	747	2	3340	54	434	5	2630
16	6921	1	5500	55	434	5	4030
17	6921	1	5900	56	434	5	4230
18	7000	3	1500	57	15208	1	6320
19	7000	3	2200	58	15208	1	8490
20	7004	1	740	59	14783	3	150
21	7004	1	1250				
22	7004	1	2210				
23	7201	1	4100				
24	7201	2	300				
25	7201	2	1200				
26	7245	1	1700				
27	7245	1	2700				
28	7245	1	3900				
29	88	18	671				
30	88	18	3386				
31	88	18	5842				
32	813	8	2922				
33	813	8	5451				
34	813	8	7150				
35	849	4	3249				
36	849	4	3789				
37	862	4	5390				
38	862	4	6709				
39	7830	2	996				

Sitomattoman kantavan kerroksen murskeen laadun vaikutus tien vaurioitumiseen
LIITTEET

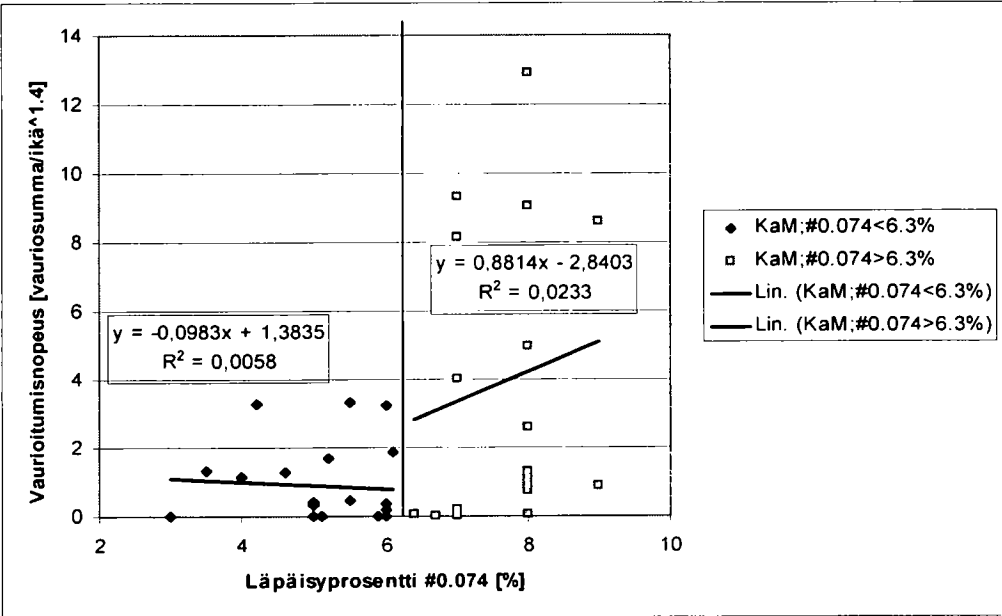
Kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys (ikäeksponentti 1.0)



Kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys, hienoainespitoisuuden raja-arvona käytetty 5,4 %



Kalliomurskeen hienoainespitoisuuden ja tien vaurioitumisnopeuden välinen yhteys, hienoainespitoisuuden raja-arvona käytetty 5,4 %



Vauriosummaennusteet ja toteutuma SCI300:n suhteen

Pääselittäjänä SCI300

- ikäeksponentilla kaksi $R^2=14\%$.

$$Y = 0.147 + 0.219 \times SCI300 + \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} alusta_{ston} = 0.084 \\ alusta_{sttu} = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Leveys \\ 6.4m = 0.588 \\ 8.1m = 0.195 \\ 11.9m = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} PLAJI_{PV} = 0.541 \\ PLAJI_{PB} = 0.336 \\ PLAJI_{AB} = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} KVL R \\ 34_{ajon/d} = 0.000 \\ 111_{ajon/d} = -0.126 \\ 279_{ajon/d} = 0.277 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Etelä = -0.119 \\ Pohjoinen = 0.000 \end{array} \right\} \end{array} \right] \times SCI300$$

$Y = \text{vauriosumman määrä} / \text{aika}^{2.0}$.

- ikäeksponentilla 1.4 $R^2=16\%$.

$$Y = 0.482 + 0.764 \times SCI300 + \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} alusta_{ston} = 0.587 \\ alusta_{sttu} = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Leveys \\ 6.4m = 1.855 \\ 8.1m = 0.423 \\ 11.9m = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} PLAJI_{PV} = 1.959 \\ PLAJI_{PB} = 1.378 \\ PLAJI_{AB} = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} KVL R \\ 34_{ajon/d} = 0.000 \\ 111_{ajon/d} = -0.357 \\ 279_{ajon/d} = 0.850 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Etelä = 0.135 \\ Pohjoinen = 0.000 \end{array} \right\} \end{array} \right] \times SCI300$$

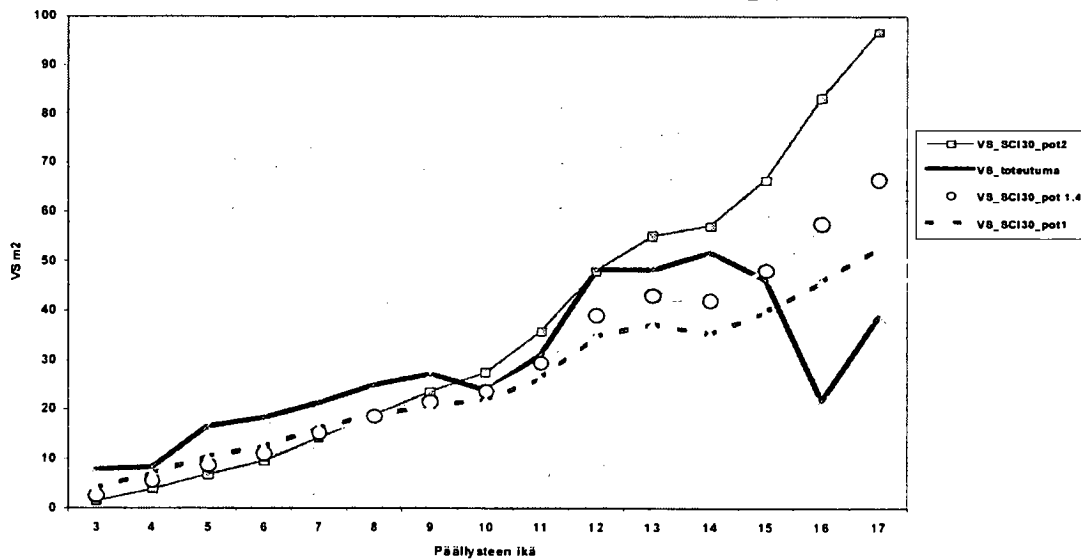
$Y = \text{vauriosumman määrä} / \text{aika}^{1.4}$.

- ikäeksponentilla yksi $R^2=18\%$.

$$Y = 1.108 + 1.872 \times SCI300 + \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} alusta_{ston} = 1.839 \\ alusta_{sttu} = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Leveys \\ 6.4m = 3.820 \\ 8.1m = 0.286 \\ 11.9m = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} PLAJI_{PV} = 4.651 \\ PLAJI_{PB} = 3.222 \\ PLAJI_{AB} = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} KVL R \\ 34_{ajon/d} = 0.000 \\ 111_{ajon/d} = -0.629 \\ 279_{ajon/d} = 1.465 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Etelä = 1.278 \\ Pohjoinen = 0.000 \end{array} \right\} \end{array} \right] \times SCI300$$

$Y = \text{vauriosumman määrä} / \text{aika}^{1.0}$.

VS-ennusteet ja toisen vauriomittauksen toteutuma (VS_B)



SCI300 arvolla kuntotietorekisteriaineistosta kehitetty Kurre-kaava

- ikäeksponentilla 2.0 $R^2 = 18\%$.

$$D0 + \left\{ \begin{array}{l} alusta\ ston = 0.044 \\ alusta\ sttu = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Leveys \\ 6.4m = 0.231 \\ 8.1m = 0.091 \\ 11.9m = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} PLAJI\ PV = 0.241 \\ PLAJI\ PB = 0.172 \\ PLAJI\ AB = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} KVLR \\ 34\ ajon / d = 0.000 \\ 111\ ajon / d = -0.027 \\ 279\ ajon / d = 0.200 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Etelä = -0.053 \\ Pohjoinen = 0.000 \end{array} \right\} \times D0$$

Y = vauriosumman määrä / aika^{2.0}.

- ikäeksponentilla 1.4 $R^2 = 20.8\%$.

$$0 + \left\{ \begin{array}{l} alusta\ ston = 0.304 \\ alusta\ sttu = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Leveys \\ 6.4m = 0.727 \\ 8.1m = 0.242 \\ 11.9m = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} PLAJI\ PV = 0.895 \\ PLAJI\ PB = 0.656 \\ PLAJI\ AB = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} KVLR \\ 34\ ajon / d = 0.000 \\ 111\ ajon / d = -0.083 \\ 279\ ajon / d = 0.577 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Etelä = -0.076 \\ Pohjoinen = 0.000 \end{array} \right\} \times D0$$

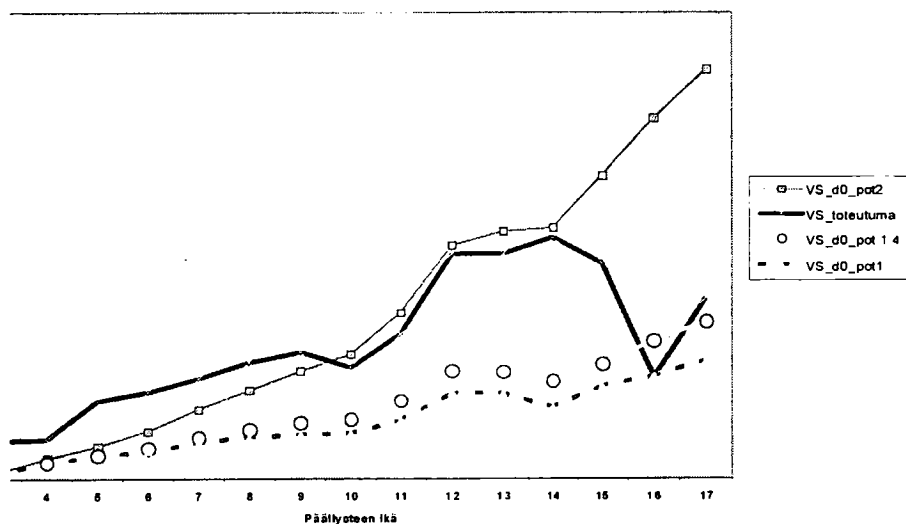
Y = määrä / aika^{1.4}.

- ikäeksponentilla 1.0 $R^2 = 22\%$.

$$0 + \left\{ \begin{array}{l} alusta\ ston = 0.837 \\ alusta\ sttu = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Leveys \\ 6.4m = 1.557 \\ 8.1m = 0.340 \\ 11.9m = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} PLAJI\ PV = 2.112 \\ PLAJI\ PB = 1.564 \\ PLAJI\ AB = 0.000 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} KVLR \\ 34\ ajon / d = 0.000 \\ 111\ ajon / d = -0.183 \\ 279\ ajon / d = 1.083 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Etelä = 0.547 \\ Pohjoinen = 0.000 \end{array} \right\} \times D0$$

Y = vauriosumman määrä / aika^{1.0}.

VS-ennusteet ja toisen vauriomittauksen toteutuma (VS_B)



ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-197-5
TIEH 3200853